BỘ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ
CỤC THÔNG TIN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ QUỐC GIA

TỔNG LUẬN | KHOA HỌC CÔNG NGHỆ KINH TẾ

ISSN 0866 - 7712 Số 2 - 2025

DỰ BÁO XU HƯỚNG PHÁT TRIỂN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ TRÊN THẾ GIỚI GIAI ĐOẠN 2023-2043 VÀ HÀM Ý CHO VIỆT NAM

Hà Nội, tháng 3 - 2025

CỤC THÔNG TIN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ QUỐC GIA
Địa chỉ: 24 Lý Thường Kiệt, Hoàn Kiếm, Hà Nội
Tel: (024)38262718; Fax: (024)39349127
BAN BIÊN TẬP:
TS. Trần Đắc Hiến *(Trưởng ban)*
ThS. Nguyễn Lê Hằng; ThS. Phùng Anh Tiến: ThS. Nguyễn Phương Anh

MỤC LỤC

TỪ VIẾT TẮT 2
GIỚI THIỆU 3
I. PHÁT TRIỂN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ 4
1.1. Bối cảnh khoa học và công nghệ 4
1.2. Một số khái niệm 5
II. CÁC CÔNG NGHỆ ĐỘT PHÁ 7
2.1. Dữ liệu lớn, công nghệ thông tin và truyền thông 7
2.2. Trí tuệ nhân tạo 11
2.3. Công nghệ robot và hệ thống tự hành 15
2.4. Công nghệ vũ trụ 19
2.5. Công nghệ siêu thanh 23
2.6. Công nghệ năng lượng và hệ thống đẩy 25
2.7. Điện tử và điện từ (E&EM) 30
III. CÁC CÔNG NGHỆ MỚI NỔI 35
3.1. Công nghệ lượng tử 35
3.2. Công nghệ sinh học và tăng cường năng lực của con người (BHET) 39
3.3. Vật liệu mới và sản xuất tiên tiến 44
IV. CÁC CÔNG NGHỆ HỘI TỤ 48
4.1. Dữ liệu - Trí tuệ nhân tạo - Tự động hóa 48
4.2. Dữ liệu - Lượng tử 49
4.3. Vũ trụ - Siêu thanh - Vật liệu 49
4.4. Vũ trụ - Lượng tử 49
4.5. Dữ liệu - Trí tuệ nhân tạo - Công nghệ sinh học 50
4.6. Dữ liệu - Trí tuệ nhân tạo - Vật liệu 50
4.7. Năng lượng - Vật liệu - Trí tuệ nhân tạo 50
MỘT SỐ NHẬN XÉT VÀ KHUYẾN NGHỊ ĐỐI VỚI VIỆT NAM 50
TÀI LIỆU THAM KHẢO 53

TỪ VIẾT TẮT

Viết tắt	Diễn giải (Tiếng Anh)	Dịch nghĩa (Tiếng Việt)
AGI	Artificial General Intelligence	Trí tuệ nhân tạo tổng quát
AI	Artificial Intelligence	Trí tuệ nhân tạo
AIoT	Artificial Intelligence of Things	Trí tuệ nhân tạo kết hợp với Internet vạn vật
AM	Additive Manufacturing	Công nghệ sản xuất bồi đắp (In 3D)
BHET	Bio and Human Enhancement Technologies	Công nghệ tăng cường sinh học và năng lực con người
CBRN	Chemical, Biological, Radiological and Nuclear	Hóa học, Sinh học, Phóng xạ và Hạt nhân
CRISPR	Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats	Công nghệ chỉnh sửa gen CRISPR
DEW	Directed Energy Weapon	Vũ khí năng lượng định hướng
DIM	Deception, Identification & Monitoring	Đánh lừa, Nhận dạng và Giám sát
E&EM	Electronics & Electromagnetics	Điện tử và Điện từ
EDT	Emerging And/Or Disruptive Technology	Công nghệ mới nổi và/hoặc đột phá
GAI	Generalised Artificial Intelligence	Trí tuệ nhân tạo khái quát
HGV	Hypersonic Glide Vehicle	Phương tiện lướt siêu thanh
HT	Hypersonic Technologies	Công nghệ siêu thanh
IoT	Internet of Things	Internet vạn vật
LIDAR	Light Detection and Ranging	Công nghệ đo khoảng cách bằng laser
ML	Machine Learning	Học máy
PNT	Positioning, Navigation and Timing	Định vị, Dẫn đường và Đồng bộ thời gian
QC	Quantum Communication	Thông tin liên lạc lượng tử
QIS	Quantum Information Science	Khoa học thông tin lượng tử
QKD	Quantum Key Distribution	Phân phối khóa lượng tử
RAS	Robotics and Autonomous Systems	Hệ thống robot và tự động hóa
SWaP-C	Size, Weight, Power and Cost	Kích thước, Trọng lượng, Công suất và Chi phí
TRL	Technology Readiness Levels	Các cấp độ sẵn sàng công nghệ
UAV	Unmanned Air Vehicles	Phương tiện bay không người lái
UxV	Unmanned Vehicles	Phương tiện không người lái

GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh thế giới đang bước vào giai đoạn chuyển đổi mạnh mẽ dưới tác động của cuộc Cách mạng công nghiệp lần thứ tư (CMCN 4.0), khoa học và công nghệ (KH&CN) đóng vai trò trung tâm trong việc định hình tương lai phát triển của các quốc gia. Xu hướng phát triển KH&CN giai đoạn 2023-2043 sẽ được đặc trưng bởi sự kết hợp và hội tụ mạnh mẽ giữa các lĩnh vực công nghệ, tạo ra các hệ thống thông minh, kết nối, phi tập trung và kỹ thuật số. Những tiến bộ này không chỉ tạo ra các sản phẩm, dịch vụ và mô hình sản xuất mới mà còn thúc đẩy sự thay đổi căn bản trong cách thức con người sống, làm việc và tương tác với thế giới xung quanh.

Việt Nam, trong quá trình hướng tới mục tiêu trở thành quốc gia phát triển, không thể đứng ngoài xu hướng chung của thế giới. Để bắt kịp, hòa nhập và khai thác hiệu quả các thành tựu KH&CN toàn cầu, Việt Nam cần nhận diện rõ những xu hướng chính, hiểu rõ các mức độ trưởng thành công nghệ và xác định các công nghệ chiến lược cần ưu tiên phát triển.

Trước bối cảnh này, tổng luận "Dự báo xu hướng phát triển KH&CN trên thế giới giai đoạn 2023-2043 và hàm ý cho Việt Nam" được xây dựng nhằm cung cấp cái nhìn tổng quan về các xu hướng công nghệ chủ đạo trên thế giới, đồng thời đánh giá những cơ hội và thách thức mà Việt Nam có thể đối mặt. Tổng luận không chỉ phân tích sự phát triển của các công nghệ chiến lược mà còn đề xuất các định hướng chính sách nhằm giúp Việt Nam tận dụng hiệu quả các xu hướng này, hướng tới một nền kinh tế đổi mới sáng tạo, bền vững và có sức cạnh tranh cao trong khu vực và trên thế giới.

Hy vọng rằng tổng luận sẽ là nguồn tài liệu tham khảo hữu ích cho các nhà hoạch định chính sách, các nhà nghiên cứu, doanh nghiệp và cộng đồng KH&CN trong việc xây dựng chiến lược phát triển và ứng dụng công nghệ, góp phần thúc đẩy quá trình công nghiệp hóa, hiện đại hóa đất nước trong giai đoạn tới.

Trân trọng giới thiệu!

CỤC THÔNG TIN KHOA HỌC VÀ

CÔNG NGHỆ QUỐC GIA

I. PHÁT TRIỂN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

1.1. Bối cảnh khoa học và công nghệ

Cuộc CMCN 4.0 đang tạo ra những thay đổi sâu rộng trong mọi mặt của đời sống, đặc biệt trong lĩnh vực sản xuất và công nghệ. Theo Klaus Schwab, Nhà sáng lập kiêm Chủ tịch điều hành Diễn đàn Kinh tế thế giới, đây là cuộc cách mạng kết nối linh hoạt giữa các hệ thống sản xuất vật lý và ảo trên quy mô toàn cầu. Sự chuyển đổi này được thúc đẩy bởi sự hội tụ giữa các lĩnh vực vật lý, sinh học và kỹ thuật số, đặc biệt là sự phát triển nhanh chóng của trí tuệ nhân tạo (AI), tự động hóa thông minh và các công nghệ hỗ trợ sự tương tác giữa con người và máy móc.

Trước đây, những tiến bộ KH&CN chủ yếu do khu vực công dẫn dắt, phục vụ các mục tiêu xã hội và chiến lược quốc gia. Tuy nhiên, trong những năm gần đây, khu vực tư nhân đã trở thành động lực chính thúc đẩy các công nghệ đột phá và mới nổi (EDT). Các tập đoàn công nghệ lớn như Google, Microsoft, Tesla, OpenAI đang dẫn đầu trong những lĩnh vực như AI, công nghệ lượng tử, công nghệ sinh học và điện tử tiên tiến. Mặc dù vậy, khu vực công vẫn giữ vai trò cốt lõi trong việc thúc đẩy nghiên cứu cơ bản, phát triển công nghệ có rủi ro cao và bảo đảm rằng tiến bộ công nghệ được ứng dụng một cách an toàn và có đạo đức.

Một xu hướng quan trọng hiện nay là sự hội tụ giữa AI, dữ liệu lớn, robot và hệ thống tự hành (RAS). Những công nghệ này không còn phát triển riêng lẻ mà ngày càng được tích hợp chặt chẽ, tạo ra hệ thống thông minh, kết nối và tự động hóa cao. Điều này đòi hỏi một chiến lược phát triển công nghệ toàn diện, không chỉ bắt kịp tốc độ phát triển nhanh chóng mà còn phải bảo đảm tính bao quát. Tuy nhiên, chính sự đa dạng và phạm vi ứng dụng rộng lớn của công nghệ cũng đặt ra thách thức trong việc xác định các lĩnh vực ưu tiên.

Các công nghệ đột phá hiện nay trải rộng từ công nghệ lượng tử, công nghệ sinh học, vật liệu mới cho đến AI. Sự kết hợp giữa các công nghệ này mở ra những khả năng chưa từng có, thúc đẩy sự đổi mới và tạo ra những bước tiến mang tính cách mạng. Xu hướng hội tụ không chỉ giúp nâng cao hiệu suất công nghệ mà còn tạo điều kiện cho các đột phá liên ngành, góp phần thay đổi nhiều lĩnh vực, từ sản xuất, y tế đến quốc phòng và an ninh.

Trong thập kỷ tới, sự giao thoa giữa con người và máy móc sẽ trở nên quan trọng hơn bao giờ hết. Giao diện người-máy, AI hỗ trợ tư duy và công nghệ cảm biến tiên tiến sẽ giúp mở rộng hiểu biết về bộ não con người, từ đó tăng cường khả năng tương tác giữa con người và công nghệ. Những tiến bộ này không chỉ nâng cao trải nghiệm người dùng mà còn có tiềm năng thúc đẩy đổi mới trong y tế, giáo dục và quản lý đô thị.

Cuộc CMCN 4.0 được định hình bởi 4 yếu tố cốt lõi: thông minh, kết nối, phi tập trung và kỹ thuật số. Trong hai thập kỷ tới, những yếu tố này dự kiến sẽ định hình mạnh

mẽ các công nghệ tiên tiến trong mọi lĩnh vực của cuộc sống, tạo nên những biến đổi sâu sắc về cách con người sống, làm việc và tương tác với thế giới xung quanh. Cụ thể hơn, bối cảnh KH&CN trong tương lai sẽ được định hình và thúc đẩy bởi 4 đặc điểm chính sau:

• *Thông minh:* AI ngày càng được ứng dụng để tăng cường khả năng phân tích, tối ưu hóa quy trình và hỗ trợ ra quyết định trong mọi lĩnh vực.

• *Kết nối:* công nghệ mạng và Internet vạn vật (IoT) đang tạo ra hệ sinh thái số, nơi dữ liệu được khai thác và chia sẻ liên tục.

• *Phi tập trung:* xu hướng điện toán biên, lưu trữ và xử lý dữ liệu phân tán giúp tăng cường tính linh hoạt và bảo mật trong các hệ thống thông tin.

• *Kỹ thuật số:* sự kết hợp giữa công nghệ số, sinh học và thông tin sẽ tạo ra những đột phá mới, mang lại nhiều cơ hội mới nhưng cũng đặt ra không ít thách thức

1.2. Một số khái niệm

1.2.1. Phân loại công nghệ

Mặc dù các thuật ngữ "công nghệ mới nổi" và "công nghệ đột phá" đã trở nên phổ biến, nhưng đến nay vẫn chưa có định nghĩa thống nhất. Tuy nhiên, theo phân loại của NATO, các công nghệ được phân thành bốn nhóm chính:

• *Công nghệ mới nổi:* gồm những công nghệ đang trong giai đoạn sơ khai hoặc các khám phá khoa học dự kiến đạt mức trưởng thành trong giai đoạn 2023-2043. Hiện tại, chúng chưa được ứng dụng rộng rãi và tác động của chúng đối với kinh tế, xã hội, quốc phòng và an ninh vẫn chưa hoàn toàn rõ ràng.

• *Công nghệ đột phá:* là những công nghệ hoặc khám phá khoa học được dự báo sẽ có ảnh hưởng sâu rộng và mang tính cách mạng, góp phần thay đổi đáng kể các lĩnh vực kinh tế, xã hội, quốc phòng và an ninh trong giai đoạn 2023-2043.

• *Công nghệ hội tụ:* sự tích hợp của các công nghệ theo cách hợp lực và sáng tạo, tạo ra những tác động đột phá mà từng công nghệ riêng lẻ không thể đạt được.

• *Công nghệ cải tiến:* những đổi mới liên tục dựa trên nền tảng công nghệ hiện có, tập trung vào tối ưu hóa kích thước, trọng lượng, mức tiêu thụ năng lượng và chi phí (SWaP-C), đồng thời nâng cao hiệu suất hoạt động.

1.2.2. Mức độ sẵn sàng công nghệ

Việc phân loại công nghệ giúp xác định rõ bản chất và tiềm năng tác động của chúng trong các lĩnh vực khác nhau, từ kinh tế, xã hội đến quốc phòng và an ninh. Tuy nhiên, để chuyển từ ý tưởng lý thuyết sang ứng dụng thực tiễn, một công nghệ cần trải qua lộ trình phát triển rõ ràng. Trong đó, mức độ sẵn sàng công nghệ (TRL) là một công cụ

quan trọng để đánh giá mức độ trưởng thành của công nghệ theo từng giai đoạn.

TRL không chỉ đo lường tiến trình phát triển công nghệ mà còn hỗ trợ các nhà hoạch định chính sách, doanh nghiệp và tổ chức nghiên cứu trong việc đưa ra quyết định đầu tư và triển khai phù hợp. Hiểu rõ mức độ sẵn sàng công nghệ là yếu tố then chốt để đánh giá tiềm năng ứng dụng của các công nghệ mới nổi, đột phá và hội tụ trong tương lai.

Hệ thống TRL do NASA phát triển và sau đó được nhiều tổ chức lớn như Bộ Quốc phòng Hoa Kỳ (DoD), Liên minh châu Âu (EU) và NATO áp dụng để đánh giá sự phát triển của công nghệ. Hệ thống này bao gồm 9 cấp độ sẵn sàng công nghệ, từ giai đoạn nghiên cứu ban đầu (TRL 1) đến khi công nghệ được chứng minh trong thực tế và sẵn sàng triển khai rộng rãi (TRL 9).

- TRL 1 - Các nguyên lý cơ bản được quan sát và báo cáo
- TRL 2 - Hình thành khái niệm công nghệ và/hoặc ứng dụng
- TRL 3 - Phân tích và thử nghiệm bằng chứng khái niệm cho các chức năng cốt lõi
- TRL 4 - Mô hình thử nghiệm được kiểm chứng trong môi trường phòng thí nghiệm
- TRL 5 - Mô hình thử nghiệm được kiểm chứng trong môi trường thực tế
- TRL 6 - Nguyên mẫu hệ thống được trình diễn trong môi trường thực tế
- TRL 7 - Nguyên mẫu được thử nghiệm trong môi trường thực tế
- TRL 8 - Hệ thống hoàn thiện và đủ điều kiện hoạt động
- TRL 9 - Hệ thống đã được chứng minh trong thực tế

12.3. Mức độ tác động của công nghệ

Đánh giá tác động tiềm năng của công nghệ mới nổi và công nghệ đột phá là một quá trình phức tạp, đòi hỏi phải xem xét nhiều yếu tố. Quá trình này cần cân nhắc các mối đe dọa từ môi trường bên ngoài, bao gồm cả yếu tố hiện tại và dự báo tương lai, đồng thời tính đến ràng buộc pháp lý, chính sách, yếu tố chính trị và chiến lược đầu tư. Bên cạnh đó, khả năng tiếp nhận và ứng dụng công nghệ của các tổ chức cũng đóng vai trò quan trọng, chịu ảnh hưởng bởi tinh thần khởi nghiệp, mức độ đổi mới và khả năng chấp nhận rủi ro.

Bảng 1.1. Mức độ tác động của các công nghệ đột phá và mới nổi (EDT)

Mức độ tác động	Hiệu suất: tốc độ, tầm hoạt động, độ chính xác, khả năng sát thương, khả năng sống sót, khả năng chi trả, tính sẵn sàng, độ tin cậy hoặc các đặc tính năng lực xác định khác.
Trung bình	Cải thiện từ 10 - 50%
Cao	Cải thiện từ 50 - 100%
Cách mạng	Cải thiện hơn 100%, hoặc cho phép thực hiện những hoạt động hoặc nhiệm vụ mà trước đây bị coi là không khả thi.

Nguồn: NATO (2023), Science & Technology Trends 2023-2043.

Việc đánh giá tác động trở nên phức tạp hơn khi sự đột phá không chỉ phụ thuộc vào một công nghệ đơn lẻ mà còn là kết quả của sự hội tụ nhiều công nghệ khác nhau hoặc yêu cầu phát triển các khái niệm hoàn toàn mới.

II. CÁC CÔNG NGHỆ ĐỘT PHÁ

2.1. Dữ liệu lớn, công nghệ thông tin và truyền thông

Dữ liệu lớn là thuật ngữ mô tả khối lượng dữ liệu kỹ thuật số khổng lồ, đi kèm với những thách thức về quy mô, tốc độ xử lý, tính đa dạng, độ tin cậy và khả năng trực quan hóa. Sự phát triển nhanh chóng của các công nghệ cảm biến, phương thức truyền thông tiên tiến, IoT và sự ảo hóa không gian xã hội - nhận thức (ví dụ: mạng xã hội) đã góp phần quan trọng vào sự bùng nổ dữ liệu.

Trong kỷ nguyên số, dữ liệu đóng vai trò nền tảng với tốc độ gia tăng chưa từng có. Năm 2022, thế giới tạo ra 94 Zettabyte (ZB) dữ liệu, trong đó 80-90% là dữ liệu phi cấu trúc. Nếu không có cơ chế quản lý hiệu quả, dữ liệu toàn cầu có thể tăng gấp đôi mỗi 20 năm, dự báo đạt 100.000 ZB/năm vào năm 2042.

Hiện nay, 70% GDP toàn cầu phụ thuộc vào nền kinh tế số, với 90% dữ liệu toàn cầu được tạo ra chỉ trong hai năm gần đây (2021-2022). Lưu trữ đám mây phát triển mạnh, từ 6.800 Exabyte (EB) năm 2020, dự kiến vượt 200 ZB vào năm 2025.

Mặc dù dữ liệu lớn mang lại nhiều cơ hội, nhưng cũng đặt ra thách thức lớn về năng lượng, lưu trữ và quản trị. Hiện tại, các doanh nghiệp chỉ tận dụng 32% dữ liệu họ sở hữu, và trên toàn cầu, chỉ 0,5% dữ liệu kỹ thuật số được khai thác hiệu quả.

Rất khó để đánh giá toàn diện tầm quan trọng của dữ liệu trong việc thúc đẩy và hỗ trợ sự phát triển các EDT, cũng như bảo đảm hiệu suất hoạt động của hạ tầng kỹ thuật số và nâng cao hiệu quả phân tích dữ liệu. AI là công nghệ cốt lõi giúp xử lý và khai thác dữ liệu lớn, tối ưu hóa quá trình thu thập, tổ chức và phân tích thông tin. Sự kết hợp giữa dữ liệu lớn và AI đã hình thành mạng lưới toàn cầu có đặc tính tương tự hệ thần kinh, giúp nâng cao khả năng kết nối và hỗ trợ ra quyết định trên quy mô lớn.

Trong vòng 20 năm tới, sự gia tăng dữ liệu sẽ tạo ra những tác động sâu sắc, làm thay đổi căn bản cách thức hoạt động, năng lực và sự phát triển công nghệ. Các tập dữ liệu ngày càng lớn và phức tạp, với sự gia tăng về Khối lượng, Tốc độ, Đa dạng, Độ tin cậy và Trực quan hóa (5V), sẽ đặt ra nhiều thách thức về kỹ thuật, tổ chức và khả năng tương tác trong việc thu thập, xử lý và khai thác thông tin.

Các cảm biến phân tán, hệ thống tự động hóa, công nghệ thông tin liên lạc mới (ví dụ: 6G), ăng-ten tiên tiến, tối ưu hóa phổ tần, tài sản không gian, cùng với các không gian xã hội - nhận thức ảo, bản sao kỹ thuật số, thiết bị điện tử tiết kiệm năng lượng hơn và các phương pháp phân tích dữ liệu mới, mở rộng sẽ giúp nâng cao khả năng hiểu biết

về không gian xã hội, vật lý và thông tin.

Để khai thác hiệu quả, dữ liệu cần được tiếp cận như một chuỗi các thách thức kỹ thuật, bao gồm thu thập, xử lý, khai thác và phổ biến dữ liệu số cũng như phát triển các phương pháp phân tích phù hợp. Do đó, những định hướng chiến lược trong lĩnh vực dữ liệu cần được xem xét dựa trên các nỗ lực được xác định trong các phần dưới đây.

Điện toán tiên tiến

Những tiến bộ trong toán học ứng dụng và khoa học thông tin tiếp tục mang lại các phương pháp tối ưu hóa, mô hình hóa, mô phỏng, giúp quản lý sự bất định và giải quyết các vấn đề phức tạp. Một số phương pháp tập trung vào cải tiến nền tảng, nhằm nâng cao hiệu suất mô hình hóa và mô phỏng các hệ thống phức tạp. Ngoài ra, những lĩnh vực đáng chú ý khác bao gồm các phương pháp thống kê và phân tích dữ liệu mới giúp đánh giá độ tin cậy của dữ liệu, cũng như phân tích dữ liệu dạng đồ thị và dữ liệu thưa. Những tiến bộ này được hỗ trợ bởi các kỹ thuật tính toán tiên tiến, như tính toán phân tán đa phương diện (phân tích tới biên), ngôn ngữ lập trình xác suất mới và những bước đột phá trong điện toán lượng tử.

Cùng với đó, những kết quả đột phá trong mô hình hóa và mô phỏng đang dần được hé lộ, đặc biệt là các mô hình dựa trên dữ liệu. Các mô hình này được xây dựng từ thư viện dữ liệu cơ bản và giao diện người - máy, giúp mô phỏng các quá trình và hiện tượng phức tạp trong tự nhiên. Những tiến bộ này dự kiến sẽ tiếp tục tăng tốc trong vòng 20 năm tới.

Để đáp ứng nhu cầu phân tích ngày càng cao, các hướng tiếp cận mới - đặc biệt là mô hình tính toán tiên tiến như điện toán lượng tử, các phương pháp toán học hiện đại và sự phát triển của siêu máy tính - sẽ đóng vai trò then chốt. Trong đó, các phương pháp lấy cảm hứng từ sinh học, chẳng hạn như siêu máy tính hình thái thần kinh, đang mở ra những hướng đi đầy hứa hẹn để gia tăng đáng kể năng lực xử lý dữ liệu.

Ứng dụng mới và hỗ trợ ra quyết định

Để hỗ trợ quá trình ra quyết định, dữ liệu cần được khai thác một cách hiệu quả. Trong những năm tới, các nghiên cứu và ứng dụng sẽ tập trung vào ba khía cạnh cốt lõi: ra quyết định theo nhóm, cải thiện giao diện và trực quan hóa dữ liệu, và ứng dụng phân tích dữ liệu nhằm nâng cao nhận thức tình huống. Những công nghệ này giúp tối ưu hóa quá trình tổng hợp dữ liệu, điều khiển, khám phá, thiết kế, cũng như mô hình hóa và mô phỏng. Đặc biệt, việc sử dụng bản sao kỹ thuật số (ví dụ: mô hình số ảo của một hệ thống tự nhiên) cho phép dự đoán các lỗi tiềm ẩn trong tương lai và tối ưu hóa hiệu suất nhờ vào AI, phân tích dữ liệu và mô hình hóa - mô phỏng. Sự phát triển của AI và học máy (ML), kết hợp với những tiến bộ trong phân tích dự báo, được kỳ vọng sẽ mở rộng đáng kể phạm vi ứng dụng của bản sao kỹ thuật số, thúc đẩy đổi mới trong nhiều lĩnh vực, từ công nghiệp đến nghiên cứu khoa học.

Công nghệ sổ cái phân tán

Công nghệ sổ cái phân tán (DLT) có tiềm năng to lớn trong hậu cần, quản lý nhân sự và các giao dịch tài chính. Bất kỳ giao dịch kỹ thuật số nào cầu đến sự theo dõi và bảo đảm tính xác thực đều có thể hưởng lợi từ DLT. Tuy nhiên, sức mạnh của công nghệ này phụ thuộc phần lớn vào các giao thức mã hóa được sử dụng để bảo đảm tính bảo mật và toàn vẹn dữ liệu. Vì vậy, việc triển khai các phương pháp mã hóa hậu lượng tử (PQC) ngày càng trở nên cấp bách, đặc biệt trong quá trình phát triển sổ cái kháng lượng tử (QRL). Đồng thời, công nghệ này cũng được nghiên cứu để khai thác các đặc tính lượng tử, nhất là trong lĩnh vực tiền mã hóa thế hệ mới, nhằm khắc phục những hạn chế về khả năng mở rộng và tối ưu hóa hiệu suất của blockchain.

Mạng tiên tiến

Dữ liệu chỉ thực sự có ý nghĩa khi được truyền tải đúng chỗ và đúng lúc. Do đó, sự tiến bộ của các công nghệ mạng tiên tiến, bao gồm 5G, 6G và các giao thức thông tin liên lạc thế hệ mới, ngày càng trở nên quan trọng. Những giải pháp này không chỉ tối ưu hóa về kích thước, trọng lượng, công suất và chi phí mà còn góp phần xây dựng các hệ thống mạng linh hoạt, đáp ứng nhanh chóng và hiệu quả nhu cầu trong thập kỷ tới.

Sự mở rộng của các mạng cảm biến tích hợp, kết hợp với sự liên kết chặt chẽ giữa thông tin liên lạc và xử lý dữ liệu, đang làm gia tăng nhu cầu đối với các hệ thống mạng quản lý, điều khiển thông minh và mạng đa miền. Hoạt động NC&PT trong lĩnh vực này tập trung vào việc kết nối các cảm biến thế hệ mới, đồng thời nâng cao khả năng tích hợp công nghệ nhằm xây dựng một hệ thống vận hành thông suốt và hiệu quả.

Quá trình này dẫn đến sự hội tụ của các công nghệ hiện có, bao gồm mạng biên, hồ dữ liệu, mạng cảm biến giá rẻ, mạng thông tin đa miền, cùng với các hệ thống tự hành và có người điều khiển. Việc tích hợp này không chỉ tận dụng tối đa tính phức tạp của các hệ thống mà còn tạo ra lợi thế cạnh tranh trong các lĩnh vực, từ quân sự đến công nghiệp và thương mại. Đặc biệt, AI đóng vai trò trung tâm trong việc khai thác dữ liệu thô, tối ưu hóa quá trình phân tích và kết nối các hệ thống không đồng nhất thành một mạng lưới thống nhất.

Một trong những đột phá quan trọng trong lĩnh vực này là sự phát triển của mạng tiêu thụ năng lượng cực thấp, giúp duy trì khả năng giám sát liên tục trong nhiều năm mà không cần bảo trì. Bên cạnh đó, IoT, điện toán đám mây và điện toán biên cũng đang hưởng lợi từ những tiến bộ trong công nghệ mạng tiên tiến, tạo nền tảng vững chắc cho các ứng dụng thương mại và công nghiệp trong tương lai.

Cảm biến

Cảm biến đóng vai trò cốt lõi trong chiến lược dữ liệu. Những đột phá trong công nghệ lượng tử (như phát hiện dị thường từ tính, đo trọng lực) đã thúc đẩy sự ra đời của

thế hệ cảm biến có độ nhạy cao. Ngoài ra, các công nghệ truyền thống như radar thụ động ngày càng quan trọng trong giám sát bí mật.

Một công nghệ đáng chú ý khác là hệ thống hình ảnh tính toán, trong đó, các hệ thống quang học không sử dụng thấu kính mà thay vào đó áp dụng các phương pháp tính toán trực tiếp để tạo ra hình ảnh. Công nghệ này cũng có tiềm năng mở rộng ứng dụng cho radar, mang lại đột phá trong giám sát và nhận diện mục tiêu. Ngoài ra, nghiên cứu về radar tần số cao (HF) và công nghệ Phát hiện và Đo khoảng cách bằng ánh sáng (LiDAR) 3D đang cho thấy tiềm năng lớn, với dự báo sẽ được hoàn thiện và ứng dụng rộng rãi hơn trong những thập kỷ tới.

Sự phát triển trong giám sát trên diện rộng và thông tin liên lạc tầm xa sẽ tiếp tục được thúc đẩy, đặc biệt trong bối cảnh ngày càng gia tăng mối lo ngại về tính dễ tổn thương của các cảm biến trong không gian, nhu cầu về thiết kế ăng-ten tiên tiến và những thách thức khi hoạt động trong môi trường khắc nghiệt.

Trong lĩnh vực tin sinh học, cảm biến tích hợp với điện thoại thông minh đang mở ra khả năng giám sát sức khỏe liên tục, đồng thời hỗ trợ phát hiện và ứng phó với các mối đe dọa Hóa học, Sinh học, Phóng xạ và Hạt nhân (CBRN).

Lưu trữ dữ liệu

Một khía cạnh thường bị bỏ qua trong lĩnh vực dữ liệu lớn là nhu cầu lưu trữ khối lượng dữ liệu khổng lồ. Các công nghệ lưu trữ tiên tiến như ổ đĩa helium, ghi từ tính xếp lớp, lưu trữ ADN, máy chủ dung lượng lớn NVRAM, thiết kế quy mô giá đỡ và lưu trữ quang học 5D đều đang cho thấy tiềm năng phát triển mạnh mẽ. Tuy nhiên, thách thức về năng lượng tiêu thụ và tốc độ truy cập vẫn là những rào cản lớn cần vượt qua. Trong đó, lưu trữ ADN được đánh giá là công nghệ hứa hẹn nhất cho lưu trữ dữ liệu quy mô siêu lớn, với các tiến bộ trong công nghệ sinh học dự kiến sẽ thúc đẩy sự phát triển mạnh mẽ của lĩnh vực này.

Bên cạnh sự phát triển của công nghệ lưu trữ, các kiến trúc dữ liệu mới cũng đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện khả năng quản lý và tổ chức dữ liệu. Trong vòng 5-10 năm tới, các kho dữ liệu (data warehouse), hồ dữ liệu (data lake) và kết cấu dữ liệu sẽ cần được nâng cấp để đáp ứng nhu cầu lưu trữ và phân tích ngày càng lớn. Ngoài ra, các kiến trúc dữ liệu mô phỏng sinh học với cơ chế "quên thông minh" (intelligent forgetting) sẽ được triển khai, giúp giảm thiểu tình trạng quá tải dữ liệu và tối ưu hóa khả năng truy xuất thông tin.

Mạng và an ninh mạng

Sự phụ thuộc ngày càng tăng vào dữ liệu, mạng và cảm biến không chỉ mở ra cơ hội phát triển mà còn làm gia tăng rủi ro an ninh mạng. Trong bối cảnh đó, không gian mạng sẽ trở thành một môi trường trọng yếu, đòi hỏi các giải pháp phòng thủ toàn diện kết hợp

giữa phần cứng, con người và dữ liệu. Mô hình bảo mật Zero Trust đang nổi lên như một giải pháp chiến lược, tăng cường tính bảo mật và khả năng kiểm soát truy cập trong các hệ thống mạng phức tạp. Nguyên tắc cốt lõi của Zero Trust là "không tin tưởng bất kỳ ai, luôn xác minh", tức là không mặc định tin cậy bất kỳ thiết bị hay người dùng nào. Đồng thời, yếu tố tin cậy trong an ninh mạng sẽ tiếp tục giữ vai trò then chốt trong việc phát triển các hệ thống vật lý - mạng vững chắc và linh hoạt hơn.

Bên cạnh đó, các lưới an ninh mạng (cybersecurity mesh) đã được xác định là một hướng phát triển quan trọng, cho phép các hệ thống phân tán bảo vệ dữ liệu và tài nguyên một cách linh hoạt, đồng thời nâng cao khả năng phòng thủ trước các mối đe dọa mạng ngày càng tinh vi. Bằng cách áp dụng kiến trúc Zero Trust và lưới an ninh mạng, các tổ chức có thể xây dựng một môi trường an ninh mạng toàn diện, đáp ứng nhu cầu bảo vệ trong kỷ nguyên số hóa hiện đại.

Bảng 2.1. Dữ liệu lớn, Phân tích nâng cao và CNTT-TT, 2023-2043

Lĩnh vực trọng tâm	Tác động	TRL	Giai đoạn dự kiến
Điện toán và phương pháp tiên tiến	Cao	7-8	2025-2030
Ứng dụng mới và ra quyết định	Cao	5-6	2030-2035
Công nghệ sổ cái phân tán	Cao	5-6	2025-2030
Mạng tiên tiến	Cao	5-6	2030-2035
Cảm biến	Cao	5-6	2025-2030
Lưu trữ dữ liệu	Cao	7-8	2022-2025
Mạng và an ninh mạng	Cao	5-6	2025-2030

Nguồn: NATO (2023), Science & Technology Trends 2023-2043.

2.2. Trí tuệ nhân tạo

Trí tuệ nhân tạo (AI) đề cập đến khả năng của máy móc trong việc thực hiện các nhiệm vụ đòi hỏi trí thông minh của con người, bao gồm nhận dạng mẫu, học từ dữ liệu, suy luận, dự đoán và ra quyết định. AI có thể tồn tại dưới dạng phần mềm hoặc được tích hợp trong các hệ thống tự hành. Trong lĩnh vực AI, ML là nền tảng quan trọng, giúp máy móc tự học hỏi từ dữ liệu thông qua các thuật toán thống kê mà không cần được lập trình rõ ràng cho từng nhiệm vụ. Một nhánh quan trọng của ML là học sâu (DL), sử dụng các mạng nơ-ron nhân tạo nhiều lớp để mô phỏng cấu trúc và hoạt động của bộ não con người, giúp xử lý và phân tích dữ liệu phức tạp một cách hiệu quả hơn.

AI, được coi là một công nghệ có tác động sâu rộng, đang tạo ra những bước đột phá trong hầu hết các lĩnh vực. Mặc dù đã được nghiên cứu từ giữa thế kỷ 20, nhưng chỉ trong vài năm trở lại đây, những tiến bộ trong thuật toán, dữ liệu lớn và năng lực tính toán mới thực sự thúc đẩy sự phát triển mạnh mẽ của AI. Tuy nhiên, khi AI ngày càng

phổ biến, các hạn chế kỹ thuật và thách thức ứng dụng cũng dần lộ diện, làm dấy lên lo ngại về nguy cơ xảy ra một "mùa đông AI" mới. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết về đổi mới các nền tảng toán học, thuật toán và kỹ thuật cốt lõi để bảo đảm sự phát triển bền vững của AI.

Dữ liệu thường được ví như "dầu mỏ" của thời đại số, nhưng chính AI mới là công cụ chuyển đổi dữ liệu thành tri thức và giá trị thực tiễn. Nhu cầu tự động hóa trong việc phân tích, phân loại và khai thác dữ liệu ngày càng tăng, trở thành động lực chính thúc đẩy sự phát triển của AI. Mỗi giai đoạn phát triển của AI không chỉ mở rộng phạm vi ứng dụng mà còn đòi hỏi dữ liệu có chất lượng cao. Trong vòng ba năm qua, việc ứng dụng AI/ML đã tăng mạnh mẽ, với sự phổ biến của các phương pháp mới và bộ dữ liệu huấn luyện quy mô lớn, đặc biệt từ các nguồn mở. Đáng chú ý, AI không chỉ thúc đẩy sự tiến bộ của nhiều công nghệ tiên tiến mà còn đặt ra nhu cầu về chiến lược dài hạn, điều vẫn chưa được quan tâm đầy đủ.

AI hiện là lĩnh vực NC&PT được đầu tư mạnh mẽ trên toàn cầu, với sự tham gia tích cực của cả chính phủ và doanh nghiệp. Các tập đoàn công nghệ lớn là động lực chính thúc đẩy sự phát triển của AI, dù phần lớn nghiên cứu dựa trên công cụ mã nguồn mở và dữ liệu công khai. Tuy nhiên, hai thách thức lớn vẫn chưa được giải quyết triệt để đó là khả năng giải thích của AI và sự phối hợp hiệu quả giữa AI và con người. Bên cạnh đó, các yếu tố tâm lý, xã hội và kỹ thuật liên quan đến sự tương tác giữa con người và AI vẫn cần được nghiên cứu sâu hơn. Dù còn nhiều rào cản, AI được dự báo sẽ đóng góp 15,7 nghìn tỷ USD vào nền kinh tế toàn cầu vào năm 2030, phản ánh tiềm năng tăng trưởng vượt bậc.

Mặc dù công nghệ AI tiếp tục phát triển mạnh mẽ, việc ứng dụng thực tiễn trong doanh nghiệp lại có dấu hiệu chững lại. Nguyên nhân chính xuất phát từ những khó khăn trong khai thác tiềm năng công nghệ và sự thiếu hụt nhân lực AI có chuyên môn cao. Điều này dẫn đến một xu hướng đáng chú ý: các nhà nghiên cứu AI ngày càng tập trung vào phát triển ứng dụng thực tế thay vì chỉ nghiên cứu thuật toán. Nếu khoảng cách giữa tốc độ phát triển lý thuyết và khả năng ứng dụng tiếp tục gia tăng, AI có thể đối mặt với sự chững lại do sự vỡ mộng từ cả giới nghiên cứu lẫn doanh nghiệp, đặc biệt khi các hệ thống hiện tại vẫn còn mong manh và khó hiểu. Cùng với những thách thức về thuật toán, nguy cơ lạm dụng dữ liệu và rào cản pháp lý, AI có thể bước vào một "mùa đông" mới trong vòng 5-10 năm tới, trước khi phục hồi và tiếp tục phát triển trong giai đoạn tiếp theo.

Mục tiêu tối thượng của nghiên cứu AI là phát triển trí tuệ nhân tạo tổng quát (AGI) - một hệ thống AI có khả năng suy nghĩ và hành động với mức độ thông minh tương đương con người. Tuy nhiên, đây vẫn là một thách thức kỹ thuật to lớn và có thể chưa khả thi trong ít nhất 20 năm tới. Dù AI đã trải qua hơn 60 năm phát triển, việc đạt được mức độ nhận thức toàn diện vẫn còn rất xa vời.

AI đóng vai trò trung tâm trong cuộc CMCN 4.0, vì nó không chỉ là một công nghệ độc lập mà còn là nền tảng hỗ trợ nhiều lĩnh vực khác. Hiện nay, các tiến bộ trong AI tập trung vào bốn hướng chính: giảm sự phụ thuộc vào dữ liệu nhằm nâng cao hiệu quả huấn luyện mô hình; cải thiện tính linh hoạt và khả năng thích nghi trong môi trường phức tạp; tăng độ tin cậy và khả năng khái quát hóa trong các bài toán thực tế; và thúc đẩy sự phối hợp giữa AI với hệ thống sinh học, đặc biệt là con người.

Những tiến bộ này trải rộng trên nhiều lĩnh vực nghiên cứu và ứng dụng, sẽ được trình bày chi tiết trong các phần tiếp theo.

Trí tuệ nhân tạo tiên tiến

Trong hai thập kỷ tới, các phương pháp AI mới dựa trên nền tảng toán học và thống kê sẽ đóng vai trò quan trọng trong việc định hình sự phát triển và ứng dụng của AI. Mặc dù AI đang phát triển nhanh chóng, các phương pháp hiện tại vẫn còn nhiều hạn chế, đặc biệt là niềm tin và tính minh bạch (hay khả năng giải thích của AI). Một số chuyên gia thậm chí cho rằng những lỗ hổng nghiêm trọng trong các ứng dụng AI đòi hỏi một cách tiếp cận hoàn toàn mới để nâng cao độ tin cậy và khả năng ứng dụng.

AI hiện đang phát triển theo hai hướng chính: biểu tượng (symbolic) và biểu trưng (sub-symbolic), vốn thường được nghiên cứu riêng biệt. Việc kết hợp hai phương pháp này có thể giúp cải thiện độ chính xác và khả năng ra quyết định của hệ thống AI. Các phương pháp biểu tượng, đại diện cho làn sóng nghiên cứu AI đầu tiên, có ưu thế trong việc tăng cường khả năng giải thích và tái hiện kết quả, giúp AI trở nên đáng tin cậy hơn. Lĩnh vực này đang thu hút sự quan tâm trở lại và được kỳ vọng sẽ có những đột phá quan trọng trong tương lai gần.

Một trong những yếu tố quan trọng giúp AI đạt hiệu suất vượt trội trong thập kỷ qua là sự phát triển của mạng nơ-ron nhân tạo, một nhánh của ML và là nền tảng của DL. Nhờ khả năng mô phỏng cơ chế sinh học, mạng nơ-ron đặc biệt hiệu quả trong các bài toán nhận dạng mẫu, phát hiện tương quan và xử lý dữ liệu lớn. Với tính linh hoạt và khả năng thích ứng cao, chúng có thể học liên tục và được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực. Hiện nay, các nghiên cứu tập trung vào tối ưu hóa mạng nơ-ron nhằm nâng cao khả năng dự đoán, phân loại và xử lý thông tin.

Các ứng dụng AI

Những bước tiến quan trọng nhất trong AI chủ yếu gắn liền với các ứng dụng thực tiễn của nó. Điểm đáng chú ý là phạm vi ứng dụng rộng lớn và tác động sâu sắc mà AI mang lại trên nhiều lĩnh vực, từ khoa học, kinh tế, quốc phòng đến đời sống xã hội. AI ngày càng được tích hợp vào các hệ thống và quy trình, đặc biệt trong các lĩnh vực chiến lược. Một số ứng dụng tiêu biểu có tiềm năng tạo ra đột phá bao gồm trí tuệ xã hội nhân tạo, tự động hóa chiến dịch lan truyền thông tin sai lệch, chiến tranh nhận thức, tạo và phát hiện "deep fake", hỗ trợ kiểm soát không lưu và vũ khí trên không, nhận dạng hình

ảnh độ phân giải cao, tạo hình ảnh từ mô tả văn bản, điều hướng trong môi trường có sự tương tác của con người và dịch thuật các ngôn ngữ ít phổ biến.

AI không chỉ giúp tăng tốc nghiên cứu mà còn mở ra những mô hình khoa học mới. Tiềm năng này đã được chứng minh qua các thành tựu đột phá, chẳng hạn như giải mã cấu trúc gấp của protein - một bài toán khoa học tồn tại suốt 50 năm, hay hỗ trợ phát triển vật liệu mới. Những thành công này cho thấy AI vẫn còn nhiều tiềm năng chưa được khai thác trong việc thúc đẩy khám phá khoa học và đổi mới công nghệ.

Một trong những lĩnh vực AI phát triển mạnh mẽ nhất hiện nay là các hệ thống có khả năng tạo ra hình ảnh, video hoặc văn bản từ dữ liệu đầu vào. Năm 2022 chứng kiến sự bùng nổ của AI tạo sinh với sự ra đời của các công cụ như Stable Diffusion 2.1, DALL-E 2, Midjourney (tạo hình ảnh) và ChatGPT (tạo văn bản, hỗ trợ chẩn đoán và xử lý ngôn ngữ). Những công cụ này không chỉ ngày càng phổ biến và tinh vi mà còn mở ra nhiều cơ hội ứng dụng mới, đồng thời đặt ra những thách thức về đạo đức và xã hội.

Gần đây, một trong những bước tiến quan trọng nhất trong AI là sự ra mắt của GPT-4o - mô hình AI tiên tiến nhất của OpenAI, với 200 tỷ tham số, có khả năng xử lý đồng thời văn bản, hình ảnh và âm thanh với mức độ tự nhiên gần giống con người. GPT-4o không chỉ được ứng dụng rộng rãi trong mô hình hóa ngôn ngữ, sáng tạo nội dung chatbot mà còn hỗ trợ phân tích dữ liệu đa phương thức. Nhờ khả năng trò chuyện, viết bài và thực hiện các nhiệm vụ phức tạp, GPT-4o đã trở thành nền tảng cho nhiều hệ thống AI hiện đại.

Mặc dù AI tạo sinh mang lại nhiều cơ hội, mức độ tinh vi ngày càng cao của công nghệ này cũng làm dấy lên những lo ngại về tính xác thực của thông tin, an toàn bảo mật và tác động xã hội. Việc kiểm soát và quản lý AI một cách hiệu quả đang trở thành một thách thức lớn đối với cả giới nghiên cứu và các nhà hoạch định chính sách. Tuy nhiên, bên cạnh những rủi ro, AI vẫn tiếp tục đóng vai trò là động lực chính thúc đẩy đổi mới sáng tạo, mở ra những hướng phát triển đầy tiềm năng trong tương lai.

Ứng phó với AI (Counter-AI)

Khi AI ngày càng được ứng dụng rộng rãi, việc phát hiện, ngăn chặn và giảm thiểu tác động từ các mối đe dọa liên quan đến AI, cũng như làm suy yếu hệ thống AI của đối thủ, trở thành nhiệm vụ quan trọng. Các cuộc đối đầu giữa các hệ thống AI đang xuất hiện ngày càng nhiều, đặc biệt trong các chiến dịch lan truyền thông tin sai lệch, trong khi tác động của AI trong hỗ trợ tội phạm công nghệ cao vẫn chưa được đánh giá đầy đủ.

Xung đột giữa các hệ thống AI không còn là giả thuyết mà đã trở thành thực tế. Do đó, nhu cầu phát triển các chiến lược nhằm xác định, mô hình hóa AI đối thủ, đánh giá điểm yếu và triển khai biện pháp đối phó đang trở nên cấp thiết. Điều này đòi hỏi sự gia tăng đầu tư vào NC&PT để tìm ra cách tiếp cận hiệu quả hơn trong việc ngăn chặn và

kiểm soát rủi ro từ AI. Đồng thời, cần có các nghiên cứu chuyên sâu về tác động của AI đối với tội phạm công nghệ cao để đưa ra giải pháp phòng chống kịp thời.

Bên cạnh đó, các mô hình AI hiện tại vẫn còn mong manh, dễ bị tổn thương trước các cuộc tấn công và sai lệch dữ liệu. Đánh giá và cải thiện tính bền vững, độ an toàn và khả năng xác thực của AI sẽ là nhiệm vụ quan trọng trong thời gian tới. Để bảo đảm rằng AI đưa ra quyết định đáng tin cậy, phù hợp với đạo đức và tuân thủ các quy tắc pháp lý của từng quốc gia, cần tập trung vào phát triển các hệ thống AI linh hoạt, có khả năng giải thích cao, đáng tin cậy và có thể hợp tác hiệu quả với con người.

Một khía cạnh quan trọng khác là thiết lập các quy trình và tiêu chuẩn nhằm xác minh, xác thực và chứng nhận hệ thống AI, bảo đảm an toàn và hiệu quả trong ứng dụng thực tế. Việc này giúp tăng cường sự minh bạch và tính chính xác của AI, đồng thời là nền tảng quan trọng để quản lý và kiểm soát các rủi ro liên quan đến công nghệ này trong tương lai.

Cộng sinh người-máy

Một trong những thách thức cốt lõi của AI là xây dựng mô hình hợp tác hiệu quả giữa con người và máy móc, trong đó AI có thể hỗ trợ và tương tác linh hoạt với các hệ thống do con người điều khiển. Các nghiên cứu trong lĩnh vực này đang tiến triển nhanh chóng, tập trung vào việc phát triển AI có khả năng giải thích, xây dựng lòng tin và bảo đảm tính xác thực cũng như an toàn khi triển khai trong thực tế.

Dữ liệu từ các nghiên cứu gần đây cho thấy mối quan tâm ngày càng tăng về cách AI không chỉ phát triển về mặt kỹ thuật mà còn phải thích ứng với các yếu tố xã hội - kỹ thuật để tối ưu hóa sự tương tác với con người. Khả năng giải thích, độ tin cậy và tính tái tạo kết quả đang trở thành những trọng tâm nghiên cứu, với dự báo sẽ có những đột phá trong 5-10 năm tới. Niềm tin của con người vào AI phụ thuộc vào những tiến bộ này, do đó, các thuật toán AI/ML mới cần được thiết kế để cung cấp thông tin rõ ràng về giới hạn và rủi ro của hệ thống AI.

Bảng 2.2. Trí tuệ nhân tạo, 2023-2043

Lĩnh vực trọng tâm	Tác động	TRL	Giai đoạn dự kiến
AI tiên tiến	Cách mạng	3-4	2035 hoặc muộn hơn
Các ứng dụng của AI	Cao	5-6	2025-2030
Ứng phó với AI	Cách mạng	3-4	2030-2035
Cộng sinh người - máy	Cách mạng	3-4	2035 hoặc muộn hơn

Nguồn: NATO (2023), Science & Technology Trends 2023-2043.

2.3. Công nghệ robot và hệ thống tự hành

Tự động hóa là khả năng của một hệ thống phản ứng trước các tình huống không

chắc chắn bằng cách tự động tổng hợp và lựa chọn phương án hành động tối ưu để đạt được mục tiêu. Quá trình này dựa trên kiến thức, sự hiểu biết theo ngữ cảnh về môi trường xung quanh, bản thân hệ thống và tình huống cụ thể. Các hệ thống tự động hóa được phân loại theo nhiều cấp độ, từ hoàn toàn thủ công đến hoàn toàn tự động, phản ánh mức độ tự chủ của hệ thống.

Công nghệ robot đóng vai trò then chốt trong NC&PT các hệ thống tự hành ở mọi cấp độ, bao gồm cả những hệ thống hoàn toàn do con người điều khiển. Phương tiện không người lái (UxV) có thể được vận hành từ xa hoặc hoạt động tự động tùy theo nhiệm vụ. Một số ứng dụng quan trọng của công nghệ này gồm: tiếp cận các khu vực nguy hiểm hoặc khó tiếp cận, giám sát liên tục và hoạt động trong thời gian dài, giảm chi phí vận hành và tối ưu hóa hậu cần.

Hệ thống robot, UxV và các nền tảng tự hành đang trở thành công nghệ quan trọng trong nhiều lĩnh vực, đặc biệt khi kết hợp với AI và dữ liệu lớn. RAS không chỉ hoạt động trong môi trường thực tế mà còn tham gia vào không gian số, đóng vai trò quan trọng trong việc thu thập, xử lý thông tin và thực hiện hành động một cách linh hoạt.

Sự phát triển của hệ thống tự hành đã diễn ra trong nhiều thập kỷ, nhưng những đột phá trong AI và khoa học dữ liệu trong 20 năm qua đã thúc đẩy việc ứng dụng chúng vào cả môi trường thực tế và ảo. Nhờ AI tích hợp, cùng với xu hướng giảm SWaP-C, RAS đang trở thành một công nghệ hiệu quả và tiết kiệm chi phí cho nhiều hoạt động. Điều này được thể hiện rõ qua sự phổ biến ngày càng tăng của UxV trong cả ứng dụng dân sự và quân sự. Đặc biệt, các hệ thống thu thập thông tin tình báo, giám sát, xác định mục tiêu và trinh sát cũng như các nền tảng tấn công chính xác đang dần trở thành thành phần không thể thiếu trong các chiến lược quốc phòng và an ninh.

Mục tiêu cốt lõi của việc phát triển và triển khai RAS là xây dựng mô hình hợp tác hiệu quả giữa con người và hệ thống tự hành, bất kể mức độ tự động hóa. AI có thể đảm nhận các nhiệm vụ đơn điệu, nguy hiểm hoặc tốn kém, trong khi con người tập trung vào các quyết định chiến lược, phát huy khả năng sáng tạo và linh hoạt. Nhờ những cải tiến về công nghệ và khả năng tiếp cận ngày càng cao, vai trò của RAS trong các hoạt động quan trọng tiếp tục gia tăng.

Các hệ thống tự hành có thể hoạt động ở nhiều mức độ khác nhau, từ hoàn toàn tự động, bán tự động đến điều khiển từ xa. Mức độ độc lập của hệ thống phụ thuộc vào nhiều yếu tố như khả năng cảm biến, loại nhiệm vụ, hạ tầng truyền thông, năng lực xử lý trên thiết bị, cũng như các quy định pháp lý và chính sách liên quan. Xu hướng ứng dụng ngày càng nhiều các hệ thống bán tự động và hoàn toàn tự động sẽ mở rộng đáng kể tiềm năng của AI, tạo ra một môi trường nơi một cá nhân có thể hoạt động như một đội nhóm, một con tàu có thể hoạt động như một hạm đội và một máy bay có thể đóng vai trò như một phi đội.

Sự phát triển của AI, dữ liệu lớn và công nghệ tự hành sẽ tiếp tục tái định hình mối quan hệ giữa con người và máy móc, mang lại những bước tiến đột phá trong tự động hóa và tối ưu hóa hoạt động trên nhiều lĩnh vực, từ công nghiệp, giao thông, y tế đến quốc phòng và an ninh.

Các lĩnh vực phát triển của RAS có thể được phân thành 4 nhóm lớn như sau:

RAS tiên tiến

Những bước tiến quan trọng trong RAS, cả hiện tại và tương lai, chủ yếu dựa trên những cải tiến về giảm SWaP-C, tích hợ AI và phát triển các thuật toán mô phỏng hành vi bầy đàn. Việc tối ưu hóa SWaP-C sẽ tiếp tục được thúc đẩy nhờ các đột phá trong công nghệ thu nhỏ, phương pháp sản xuất tiên tiến, cảm biến tiết kiệm năng lượng thế hệ mới và công nghệ thông tin liên lạc kỹ thuật số. Những cải tiến này không chỉ giúp giảm chi phí mà còn mở rộng phạm vi triển khai thực tế của RAS, tạo ra những hệ thống linh hoạt và hiệu quả hơn.

Bên cạnh đó, sự tiến bộ trong công nghệ in vật liệu điện tử và phần cứng đang mở ra khả năng phát triển các hệ thống RAS dùng một lần, được thiết kế tùy chỉnh thông qua công nghệ in 3D, giúp tối ưu hóa cho từng nhiệm vụ cụ thể. Điều này không chỉ tăng tính linh hoạt mà còn giảm đáng kể thời gian sản xuất và chi phí vận hành trong nhiều lĩnh vực.

Một trong những lĩnh vực quan trọng nhất trong quá trình phát triển của RAS là tích hợp AI. Công nghệ tự hành linh hoạt dựa trên ML đang tiến triển nhanh chóng, đặt ra những thách thức về chứng nhận, kiểm định và độ tin cậy, nhưng đồng thời cũng mang lại cơ hội phát triển nhờ những đột phá về thuật toán DL và điều khiển tự động. Các thách thức kỹ thuật vẫn cần được giải quyết, bao gồm: phát triển mạng nơ-ron sâu để nhận dạng, học tăng cường trong điều khiển và mô hình học trực tuyến. Cùng với đó, những bước tiến trong theo dõi chuyển động đa đối tượng theo thời gian thực đang góp phần nâng cao khả năng phản ứng của RAS trong môi trường phức tạp.

Ứng dụng của RAS

Việc triển khai RAS trong quân sự, công nghiệp và doanh nghiệp (đặc biệt trong sản xuất và hậu cần) đang được mở rộng nhanh chóng nhờ cải tiến về chi phí, tính linh hoạt và công nghệ thu nhỏ. Ba xu hướng nổi bật trong lĩnh vực này bao gồm:

- *Phát triển và ứng dụng hệ thống hợp tác:* các đội hình tự hành trong nhiều môi trường khác nhau (trên không, mặt đất, dưới nước, không gian số) đang được nghiên cứu nhằm tối ưu hóa sự phối hợp giữa con người và máy móc, giúp nâng cao khả năng vận hành và ra quyết định trong các tình huống phức tạp.
- *Tiến bộ trong hệ thống vi mô và siêu nhỏ mô phỏng sinh học:* nhờ các cảm biến và công nghệ mô phỏng sinh học, RAS có thể hoạt động hiệu quả hơn trong không gian

hạn chế, đồng thời nâng cao năng lực tác chiến trong điều kiện môi trường khắc nghiệt.

- *Mở rộng phạm vi sử dụng trong quân sự và công nghiệp:* RAS đang được tích hợp trong nhiều lĩnh vực, từ trinh sát, giám sát và thu thập thông tin tình báo ở môi trường đô thị, phương tiện hoạt động dưới nước lâu dài, tàu hải quân không người lái, đến hỗ trợ liên lạc và tác chiến trong các môi trường trong lòng đất.

Ngoài ra, sự kết hợp giữa RAS và công nghệ in 3D đang mở ra tiềm năng đột phá trong các chiến dịch quân sự tương lai, cho phép sản xuất nhanh chóng các thiết bị chuyên dụng ngay tại thực địa. Nhờ những cải tiến không ngừng, RAS không chỉ trở thành yếu tố quan trọng trong chiến lược phát triển công nghệ tiên tiến mà còn đóng vai trò then chốt trong tối ưu hóa, tự động hóa trên nhiều lĩnh vực.

Ứng phó với RAS

Sự phát triển nhanh chóng UxV và các nhóm thiết bị tự hành trong nhiều lĩnh vực đang đặt ra yêu cầu cấp thiết về các biện pháp ứng phó nhằm dự đoán, kiểm soát và ngăn chặn những mối đe dọa tiềm ẩn từ các hệ thống này. Các giải pháp đối phó bao gồm các phương pháp trực tiếp, chẳng hạn như gây nhiễu, vô hiệu hóa hoặc chiếm quyền điều khiển, và các phương pháp gián tiếp, như làm gián đoạn hệ thống điều phối, tác động vào thuật toán AI hoặc khai thác điểm yếu về năng lượng và thông tin liên lạc. Tuy nhiên, tương tác và đối đầu giữa các nhóm thiết bị tự hành vẫn là một lĩnh vực nghiên cứu còn nhiều khoảng trống.

Trong thập kỷ tới, việc nâng cao năng lực ứng phó với RAS sẽ trở thành một ưu tiên, đặc biệt khi các nền tảng UxV ngày càng phổ biến và dễ tiếp cận hơn. Nếu không có cơ chế kiểm soát phù hợp, sự gia tăng của các hệ thống tự hành có thể dẫn đến những hậu quả khó lường, từ xung đột tác chiến trong quân sự đến rủi ro an ninh mạng và giám sát diện rộng.

Cộng sinh người-máy

Nghiên cứu về cộng sinh giữa con người và máy móc đang mở rộng, hướng tới việc xây dựng mô hình hợp tác thông minh, trong đó con người và hệ thống tự hành có thể hoạt động như đồng đội, đối tác chiến lược hoặc cộng sự trong các nhiệm vụ phức tạp. Những nghiên cứu này nhấn mạnh rằng con người không thể xử lý toàn bộ lượng dữ liệu khổng lồ do các hệ thống tự hành thu thập, cũng như không thể giám sát tất cả quá trình vận hành theo cách thủ công.

Do đó, sự tương tác tự nhiên và hiệu quả hơn giữa AI, RAS và con người sẽ góp phần nâng cao hiệu suất hoạt động. Các khía cạnh trọng tâm của nghiên cứu này bao gồm: xác định và báo hiệu thời điểm con người cần tham gia vào quá trình điều khiển; và phát triển AI có thể đánh giá mức độ tin cậy của thông tin đầu vào từ người vận hành.

Những tiến bộ trong cộng sinh người-máy không chỉ giúp tối ưu hóa hiệu suất vận

hành mà còn bảo đảm rằng con người và hệ thống tự hành có thể phối hợp một cách thông suốt. Điều này không chỉ tăng cường tính hiệu quả mà còn giảm thiểu rủi ro trong các môi trường tác chiến và công nghiệp phức tạp.

Bảng 2.3. Robot và Hệ thống tự động (RAS), 2023-2043.

Lĩnh vực trọng tâm	Tác động	Cấp độ sẵn sàng công nghệ (TRL)	Giai đoạn dự kiến
RAS tiên tiến	Cao	5-6	2025-2030
Ứng dụng RAS	Cao	5-6	2025-2030
Ứng phó với RAS	Cao	3-4	2030-2035
Cộng sinh người - máy	Cao	3-4	2030-2035

Nguồn: NATO (2023), Science & Technology Trends 2023-2043.

2.4. Công nghệ vũ trụ

Vũ trụ là một môi trường vật lý đặc thù, thách thức những quan niệm truyền thống về không gian, thời gian và địa lý. Không gian vũ trụ thường được xác định bắt đầu từ độ cao khoảng 90-100 km so với mực nước biển (đường Kármán). Các công nghệ vũ trụ không chỉ tận dụng mà còn phải thích nghi với điều kiện khắc nghiệt của môi trường này, bao gồm quyền tự do tiếp cận, vi trọng lực, môi trường gần như chân không, sự cô lập, cùng các yếu tố cực đoan như nhiệt độ, áp suất, rung động và bức xạ.

Loài người đã khai thác không gian vũ trụ trong hơn 60 năm qua, nhưng thập kỷ gần đây chứng kiến sự bùng nổ mạnh mẽ về nghiên cứu và ứng dụng công nghệ vũ trụ. Hai xu hướng chính đã thúc đẩy sự phát triển này:

Thứ nhất, ngành công nghiệp vũ trụ thương mại đã đạt được những bước tiến đáng kể, giúp mở rộng các lĩnh vực như phát triển vệ tinh, cảm biến, hệ thống thông tin liên lạc và công nghệ phóng. Các công ty tư nhân đã đóng vai trò quan trọng trong việc giảm chi phí phóng, cung cấp công nghệ tiên tiến và đẩy nhanh quá trình thương mại hóa không gian.

Thứ hai, sự phát triển của công nghệ và phương pháp sản xuất mới đã thay đổi cách tiếp cận và khai thác vũ trụ. Các công nghệ đột phá bao gồm hệ thống đẩy tiên tiến, công nghệ phóng xoay, AI tích hợp trên tàu vũ trụ, cùng với các hệ thống robot và dịch vụ bảo trì vệ tinh từ xa, cho phép sửa chữa và kéo dài tuổi thọ vệ tinh trên quỹ đạo. Ngoài ra, sự thu nhỏ của các hệ thống vũ trụ đã giúp giảm đáng kể chi phí phát triển vệ tinh, trong khi những công nghệ như cảm biến thế hệ mới, in 3D và lưu trữ năng lượng tiên tiến tiếp tục nâng cao hiệu suất hoạt động, mở ra tiềm năng lớn cho việc mở rộng khám phá vũ trụ trong tương lai.

Kết quả là không gian vũ trụ ngày càng trở nên đông đúc, cạnh tranh và tiềm ẩn nguy

cơ tranh chấp cao. Sự cạnh tranh giữa các cường quốc, đặc biệt là Trung Quốc với trạm vũ trụ Thiên Cung và kế hoạch xây dựng căn cứ trên Mặt trăng, đã biến vũ trụ thành một đấu trường chiến lược quan trọng.

Hầu hết các hoạt động vũ trụ hiện nay vẫn tập trung ở quỹ đạo thấp, trung bình và cao của Trái đất, nhưng mối quan tâm đến không gian cận Mặt trăng đang gia tăng, đặt ra yêu cầu mở rộng quy mô hoạt động trong vũ trụ lên hàng nghìn lần. Trong vòng 20 năm tới, con người dự kiến sẽ đẩy mạnh các hoạt động không gian sâu, tạo tiền đề cho những bước tiến lớn trong khai thác tài nguyên ngoài Trái đất và khám phá liên hành tinh.

Sự phát triển nhanh chóng của công nghệ vũ trụ đã thúc đẩy nhiều quốc gia gia tăng sự hiện diện và năng lực tiếp cận không gian. Tuy nhiên, việc khai thác dữ liệu từ không gian và những tiến bộ thương mại cũng đặt ra những thách thức về chính sách và luật pháp. Một số vấn đề quan trọng bao gồm cân bằng giữa mục đích thương mại, học thuật và quân sự trong không gian, quản lý tài nguyên vũ trụ chung để tránh xung đột lợi ích giữa các quốc gia, kiểm soát quá trình quân sự hóa không gian nhằm hạn chế nguy cơ xung đột leo thang. Ngoài ra, sự phát triển của các vệ tinh nhỏ với năng lực mạnh mẽ và các hệ thống chùm vệ tinh lớn đang làm thay đổi cách thức khai thác không gian, mở ra cơ hội mới nhưng cũng tạo ra những thách thức về an ninh và hợp tác quốc tế.

Vũ trụ đang nhanh chóng trở thành một lĩnh vực chiến lược không chỉ trong nghiên cứu khoa học mà còn trong kinh tế, an ninh và địa chính trị. Những tiến bộ trong công nghệ vũ trụ có thể được chia thành bốn lĩnh vực chính, định hình tương lai của ngành công nghiệp không gian và tạo nền tảng cho các hoạt động khám phá quy mô lớn trong những thập kỷ tới.

Hệ thống đẩy và phóng

Hai lĩnh vực chính trong NC&PT hệ thống đẩy vũ trụ bao gồm các hệ thống đẩy có hiệu suất/lực đẩy cao và công nghệ phóng nhanh. Trong quỹ đạo, nhu cầu về các hệ thống đẩy tiên tiến đang ngày càng gia tăng để phục vụ cho các hoạt động thám hiểm không gian gần Mặt trăng và xa hơn, mở rộng khả năng khai thác vũ trụ trong tương lai.

Những tiến bộ trong công nghệ động cơ đẩy đang dần vượt qua các phương pháp truyền thống như hệ thống đẩy hóa học (lực đẩy cao nhưng hiệu suất thấp) và hệ thống đẩy điện (hiệu suất cao nhưng lực đẩy thấp).

Một trong những công nghệ đầy hứa hẹn là động cơ đẩy nhiệt hạt nhân (NTP), hiện đang trong giai đoạn phát triển. Khi hoàn thiện, NTP có thể tăng đáng kể khả năng hoạt động trong vũ trụ, đặc biệt là trong các nhiệm vụ liên hành tinh. Tuy nhiên, công nghệ này vẫn đang trong quá trình thử nghiệm, với kế hoạch kiểm tra trên quỹ đạo vào năm 2025, sử dụng uranium làm giàu thấp cấp độ cao. Điều này đồng nghĩa với việc NTP khó có thể có tác động thực tế trước năm 2030.

Bên cạnh động cơ đẩy, công nghệ phóng nhanh và tái sử dụng cũng là một lĩnh vực NC&PT quan trọng. Sự gia tăng số lượng vệ tinh nhỏ (CubeSat, NanoSat, PicoSat...), cùng với các mối đe dọa từ môi trường vũ trụ bị tranh chấp và sự xuất hiện của vũ khí chống vệ tinh (ASAT) từ mặt đất, đang thúc đẩy nhu cầu phát triển các hệ thống phóng linh hoạt và hiệu quả hơn. Các hệ thống phóng hiện đại hướng tới mục tiêu linh hoạt, chi phí thấp, phản ứng nhanh và tái sử dụng, cho phép triển khai cả vệ tinh nhỏ và các tải trọng lớn vào quỹ đạo thấp hoặc cận quỹ đạo Trái đất.

Một xu hướng quan trọng khác là sự phát triển của các hệ thống phóng tùy chỉnh theo nhiệm vụ, cho phép chế tạo và triển khai trong vài tuần thay vì nhiều năm. Tuy nhiên, hầu hết các hệ thống phóng hiện tại chưa thể đạt đến tốc độ quay vòng cực nhanh hoặc thực hiện các nhiệm vụ phóng tại chỗ chỉ trong vài giờ tại khu vực hoạt động.

Các NC&PT trong lĩnh vực này sẽ tiếp tục tập trung vào việc nâng cao hiệu suất và độ tin cậy của các hệ thống phóng nhanh, tối ưu hóa thiết kế chuyên biệt theo từng nhiệm vụ, rút ngắn thời gian triển khai, đồng thời thúc đẩy sự phát triển thương mại để mở rộng khả năng tiếp cận không gian trên quy mô lớn hơn. Nhờ những cải tiến này, các hệ thống phóng trong tương lai sẽ không chỉ giúp giảm chi phí, mà còn tăng tốc độ phản hồi, cho phép đáp ứng linh hoạt hơn nhu cầu khai thác không gian đang phát triển nhanh chóng.

Các nền tảng vệ tinh

Sự phát triển của các nền tảng vệ tinh trong tương lai sẽ tập trung vào việc mở rộng ứng dụng chùm vệ tinh nhỏ và tối ưu hóa các yếu tố SWaP-C. Những cải tiến về khả năng xử lý dữ liệu, tính tự hành và tích hợp AI sẽ nâng cao hiệu suất cảm biến, tối ưu hóa quá trình thu thập, xử lý và phân tích dữ liệu ngay trên vệ tinh, đồng thời cải thiện khả năng phối hợp giữa các vệ tinh trong cùng một chùm. Nhờ đó, các chùm vệ tinh có thể hoạt động một cách chủ động và thông minh hơn, mang lại hiệu quả vượt trội trong giám sát, truyền thông và nghiên cứu vũ trụ.

Sự phát triển của công nghệ chế tạo tiên tiến giúp giảm chi phí sản xuất vệ tinh, mở rộng khả năng tiếp cận không gian và cho phép điều chỉnh lại cấu hình chùm vệ tinh một cách linh hoạt. Điều này cũng giúp cải thiện độ tin cậy của hệ thống, hạ thấp rào cản gia nhập thị trường và làm cho công nghệ vệ tinh trở nên dễ tiếp cận hơn đối với các quốc gia, tổ chức phi nhà nước hoặc các nhóm có sức ảnh hưởng lớn.

Mặc dù xu hướng chùm vệ tinh nhỏ đang phát triển mạnh, một số nhiệm vụ vũ trụ vẫn đòi hỏi các hệ thống vệ tinh quy mô lớn và chi phí cao, đặc biệt là trong quỹ đạo địa tĩnh. Tuy nhiên, sự phát triển của công nghệ bảo trì trên quỹ đạo đang mở ra những khả năng quan trọng như lắp ráp, tiếp nhiên liệu, sửa chữa, tái cấu hình và thu hồi vệ tinh ngay trong không gian. Một số dự án thử nghiệm đã cho thấy kết quả tích cực và đang tiến dần đến triển khai thực tế, hứa hẹn mở rộng đáng kể khả năng khai thác không gian trong tương lai.

Tuy nhiên, các công nghệ này, nếu được điều chỉnh mục đích sử dụng, cũng có thể góp phần vào sự phát triển của hệ thống chống vệ tinh. Điều này đặt ra những thách thức lớn về an ninh không gian, đòi hỏi các quốc gia phải có các chính sách kiểm soát và hợp tác chặt chẽ để tránh xung đột leo thang trong môi trường vũ trụ.

Cảm biến và thông tin liên lạc thông minh

Sự phát triển trong lĩnh vực cảm biến và thông tin liên lạc vũ trụ chịu ảnh hưởng mạnh từ các yếu tố SWaP-C, đặc biệt trong bối cảnh nhu cầu về vệ tinh nhỏ nhưng hiệu suất cao ngày càng tăng. Một trong những hướng nghiên cứu quan trọng là phát triển ăng-ten thu nhỏ, nhẹ, có khả năng hoạt động ổn định trong môi trường không gian, kết hợp với công nghệ chụp ảnh không dùng thấu kính. Bên cạnh đó, các cảm biến lượng tử, bao gồm đo từ trường và trọng lực, đang được nghiên cứu để triển khai trong không gian trong tương lai gần. Ngoài ra, việc tích hợp AI và các chức năng tự hành sẽ đóng vai trò then chốt trong việc điều phối và phối hợp hoạt động của các cảm biến, giúp tối ưu hóa quá trình thu thập dữ liệu và cải thiện hiệu suất vận hành của toàn bộ hệ thống.

Bên cạnh những tiến bộ này, giá trị của vệ tinh nhỏ chủ yếu đến từ tối ưu hóa SWaP-C trong thiết kế nền tảng và hệ thống phóng. Tuy nhiên, sự phát triển của cảm biến thông tin liên lạc và cảm biến từ xa với đặc điểm trọng lượng nhẹ, tiêu thụ ít năng lượng và có dải tần rộng sẽ nâng cao đáng kể hiệu suất hoạt động của các hệ thống này. Ngoài ra, nhu cầu về cảm biến chủ động, chẳng hạn như radar trên quỹ đạo, đã thúc đẩy sự phát triển của ăng-ten vũ trụ thu nhỏ, nhẹ và có hiệu suất cao. Những công nghệ này cho phép hệ thống cảm biến trong quỹ đạo thấp được thay thế định kỳ và nâng cấp, khi các chùm vệ tinh chi phí thấp kết thúc vòng đời và được thay thế bằng các thế hệ tiên tiến hơn, bảo đảm khả năng thu thập dữ liệu và duy trì tính linh hoạt trong không gian.

Phòng thủ không gian

Trong bối cảnh sự phụ thuộc vào các hệ thống vũ trụ ngày càng gia tăng, việc bảo vệ các nền tảng không gian trước các mối đe dọa mạng, điện từ và vật lý đang trở thành một yêu cầu cấp thiết. Đồng thời, quỹ đạo ngày càng trở nên đông đúc, với sự gia tăng của các chùm vệ tinh nhỏ quy mô lớn và mức độ rác thải không gian ngày càng cao, ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả và độ tin cậy của các hệ thống dựa trên không gian. Do đó, việc gia cố bảo vệ các hệ thống vũ trụ sẽ trở thành một lĩnh vực nghiên cứu quan trọng, trong khi các biện pháp đối phó trên không gian đối với các mối đe dọa về mạng, điện từ và vật lý sẽ tiếp tục được phát triển.

Để bảo đảm an toàn và tính bền vững của các hoạt động không gian, cần có nhiều giải pháp kết hợp, bao gồm: gia cố an ninh mạng - điện từ - vật lý, phát triển các khái niệm vận hành mới, cũng như triển khai các phương pháp tiếp cận lai đối với các nền tảng không gian. Các phát triển như vệ tinh giám sát trên quỹ đạo của Nga, hệ thống làm lóa Peresvet, vũ khí năng lượng định hướng của Trung Quốc, cùng với mối nguy hiểm

ngày càng gia tăng từ rác thải không gian, đang tạo ra mối đe dọa ngày càng lớn đối với các hoạt động không gian.

Nếu không có các biện pháp kiểm soát hiệu quả, lượng rác thải không gian có thể tiếp tục tích tụ đến mức làm cho các hoạt động không gian trở nên không còn khả thi, đe dọa tương lai của ngành công nghiệp vũ trụ và an ninh không gian toàn cầu.

Bảng 2.4. Công nghệ vũ trụ, 2023-2043.

Lĩnh vực trọng tâm	Tác động	Cấp độ sẵn sàng công nghệ (TRL)	Giai đoạn dự kiến
Thông tin liên lạc	Cao	9	2022-2025
Phòng thủ không gian	Cao	5-6	2022-2025
Các nền tảng	Cao	9	2022-2025
Hệ thống đẩy và phóng	Cao	9	2022-2025
Cảm biến	Cao	7-8	2022-2025

Nguồn: NATO (2023), Science & Technology Trends 2023-2043.

2.5. Công nghệ siêu thanh

Các hệ thống siêu thanh tiên tiến (bao gồm tên lửa, phương tiện bay) hoạt động ở tốc độ lớn hơn Mach 5 (6125 km/h). Khi đạt đến tốc độ này, sự phân ly không khí trở nên đáng kể, đồng thời tải nhiệt gia tăng, tạo ra những thách thức nghiêm trọng đối với kết cấu và vật liệu của phương tiện. Giai đoạn bay siêu thanh thường xuất hiện trong quá trình tái nhập khí quyển từ không gian hoặc khi phương tiện bay trong khí quyển nhờ động cơ duy trì, như động cơ tên lửa, động cơ phản lực tĩnh siêu âm hoặc các động cơ chu trình kết hợp.

Hệ thống vũ khí siêu thanh hiện nay bao gồm nhiều chủng loại như tên lửa tấn công phóng từ trên không, vũ khí tên lửa diệt hạm và đối đất, cùng các dòng máy bay tấn công siêu thanh có khả năng tàng hình. Những hệ thống này có thể sử dụng động năng thuần túy hoặc được trang bị thêm đầu đạn (hạt nhân hoặc phi hạt nhân). Do sở hữu tốc độ cực cao và khả năng cơ động linh hoạt, các loại vũ khí siêu thanh đặt ra bài toán khó cho việc phát triển các giải pháp phòng thủ, đặc biệt là trước những cuộc tấn công đơn lẻ hoặc các đợt tấn công quy mô lớn diễn ra đồng thời.

Các nghiên cứu về công nghệ siêu thanh đã được khởi động từ cách đây hơn 70 năm, cùng với sự mở đầu của kỷ nguyên chinh phục không gian. Đến nay, có bốn loại hệ thống siêu thanh chính bao gồm: phương tiện lướt siêu thanh (HGV), tên lửa hành trình siêu thanh (HCM), súng điện từ siêu thanh và máy bay siêu thanh có người lái. Trong số này, HGV và HCM đang là trọng tâm phát triển của công nghệ siêu thanh, trong khi các dòng máy bay siêu thanh có người lái vẫn chủ yếu ở giai đoạn nghiên cứu nền tảng.

Những đột phá trong lĩnh vực vật liệu mới, mô hình hóa - mô phỏng tiên tiến, cùng với sự phát triển của các động cơ siêu thanh hiệu suất cao đã góp phần quan trọng đẩy nhanh quá trình nghiên cứu và triển khai công nghệ siêu thanh trên diện rộng. Đến nay, nhiều quốc gia như Trung Quốc, Nga, Hoa Kỳ, Anh, Pháp, Ấn Độ, Nhật Bản và Úc đã công bố tiến hành nghiên cứu, thử nghiệm và triển khai các hệ thống siêu thanh.

Việc NC&PT công nghệ siêu thanh hiện nay được chia thành nhiều lĩnh vực chuyên sâu, sẽ được trình bày chi tiết trong các phần tiếp theo.

Phương tiện và hệ thống động cơ siêu thanh

Hiện nay, các phương tiện lướt tăng tốc siêu thanh có khả năng duy trì hành trình, phóng từ trên không đang đạt được những bước tiến quan trọng. Nghiên cứu tập trung vào nhiều khía cạnh then chốt như tối ưu hóa chi phí vận hành, công nghệ chế tạo, thiết kế khí động học, nhiệt - khí động học và năng lực điều khiển bay. Song song với đó, các hướng nghiên cứu đầy triển vọng cũng đang được đẩy mạnh đối với hệ thống động cơ phản lực dòng thẳng hai chế độ, kết hợp động cơ chu trình dựa trên tuabin. Sự kết hợp này mở ra tiềm năng đột phá trong ngành hàng không, đặc biệt trong việc phát triển máy bay siêu thanh và phương tiện bay không người lái hiệu suất cao.

Trong vòng một thập kỷ qua, các phương tiện lướt tăng tốc siêu thanh chiến thuật tầm ngắn, phóng từ trên không và trên biển, đã trở thành tâm điểm của các chương trình nghiên cứu. Công tác phát triển tiếp tục hướng đến việc cải thiện đặc tính bay, bao gồm tối ưu hóa khí động học, kiểm soát nhiệt độ khí động học, nâng cao khả năng điều khiển và tăng độ chính xác. Đồng thời, bài toán giảm chi phí chế tạo và vận hành cũng được đặt ra như một ưu tiên quan trọng. Những tiến bộ công nghệ gần đây chủ yếu tập trung vào việc ứng dụng động cơ phản lực tĩnh siêu âm sử dụng nhiên liệu hydrocarbon nhằm duy trì hành trình siêu thanh, phát triển các giải pháp quản lý nhiệt hiệu quả để thích nghi với môi trường nhiệt độ cực cao, và tìm kiếm các phương án thiết kế - sản xuất tối ưu nhằm hạ thấp chi phí tổng thể.

Bên cạnh đó, các hệ thống động cơ lai dành cho máy bay đang được xem như một công nghệ có tiềm năng tạo ra bước ngoặt trong các nhiệm vụ tình báo, giám sát và trinh sát, đồng thời mở ra cơ hội triển khai các giải pháp phóng hai giai đoạn lên quỹ đạo. Dù vậy, lĩnh vực này vẫn đang đối mặt với nhiều thách thức kỹ thuật phức tạp. Các nghiên cứu hiện nay tập trung vào việc hoàn thiện động cơ phản lực dòng thẳng hai chế độ tích hợp với động cơ chu trình dựa trên tuabin, nhằm hướng tới khả năng vận hành máy bay siêu thanh có người lái với chi phí hợp lý. Mô hình động cơ chu trình kết hợp này được kỳ vọng sẽ tối ưu hóa hiệu suất trên toàn dải tốc độ, khi cho phép chuyển đổi linh hoạt giữa động cơ phản lực cánh quạt ở tốc độ thấp và động cơ tĩnh siêu âm ở tốc độ cao. Đây được coi là hướng đi chiến lược, mang giá trị ứng dụng lớn trong tương lai và vẫn đang tiếp tục được nghiên cứu chuyên sâu.

Hệ thống phòng thủ chống vũ khí siêu thanh

Sự xuất hiện của vũ khí siêu thanh đã đặt ra thách thức đặc biệt nghiêm trọng đối với các hệ thống phòng thủ hiện nay, nhất là trước tốc độ cực cao và khả năng thực hiện các cuộc tấn công đồng loạt trên diện rộng. Trước mối đe dọa này, các biện pháp đối phó mềm như gây nhiễu hoặc đánh lừa được coi là có thể hỗ trợ làm gián đoạn, làm lệch hướng hoặc làm suy giảm hiệu quả của đòn tấn công. Tuy nhiên, để vô hiệu hóa hoàn toàn vũ khí siêu thanh, cần đến những giải pháp phòng thủ tiên tiến hơn, trong đó nổi bật là việc phát triển và triển vũ khí năng lượng định hướng như laser công suất cao, chùm hạt năng lượng hoặc các hệ thống đánh chặn được bố trí trên không gian. Đây được đánh giá là những lựa chọn khả thi nhất nhằm tăng cường năng lực phòng thủ trước các mối đe dọa siêu thanh trong tương lai gần.

Quá trình hoàn thiện và ứng dụng các hệ thống phòng thủ này cần được tiến hành đồng bộ với việc xây dựng các chính sách quản lý và hành lang pháp lý phù hợp. Điều này không chỉ giúp bảo đảm tính khả thi về mặt kỹ thuật mà còn tạo nền tảng pháp lý để vận hành hệ thống một cách hiệu quả, hướng tới mục tiêu đưa vào triển khai thực tế trong vòng 10 năm tới.

Bảng 2.5. Siêu thanh, 2023-2043

Lĩnh vực trọng tâm	Tác động	TRL	Giai đoạn dự kiến
Phòng thủ chống vũ khí siêu thanh	Cao	3-4	2030-2035
Phương tiện và hệ thống động cơ siêu thanh	Cao	5-6	2030-2035

Nguồn: NATO (2023), Science & Technology Trends 2023-2043.

2.6. Công nghệ năng lượng và hệ thống đẩy

Lĩnh vực năng lượng và hệ thống đẩy hiện nay tập trung vào sự phát triển của các công nghệ thế hệ mới trong sản xuất, lưu trữ và truyền tải năng lượng, cũng như cải tiến các hệ thống đẩy tiên tiến. Việc làm chủ công nghệ đẩy hiện đại và phát triển các nguồn năng lượng đột phá đóng vai trò trung tâm trong sự phát triển của nhân loại, ngay cả khi thế giới đang phải đối mặt với những hậu quả nghiêm trọng của biến đổi khí hậu do con người gây ra. Các công nghệ đột phá và mới nổi hứa hẹn mang lại những phương thức sản xuất năng lượng tiên tiến, đồng thời giúp tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng. Tuy nhiên, sự phát triển của những công nghệ này cũng kéo theo sự gia tăng nhu cầu tiêu thụ năng lượng, đồng thời tạo ra các tác động tiêu cực thứ cấp đối với môi trường và hệ thống năng lượng toàn cầu. Nếu không có những tiến bộ đáng kể trong lĩnh vực nghiên cứu vật liệu, dự báo đến năm 2037, hơn một nửa sản lượng năng lượng toàn cầu có thể bị tiêu thụ bởi các thiết bị điện tử.

Hiện nay, phần lớn các hoạt động NC&PT trong lĩnh vực năng lượng và hệ thống đẩy hiện nay được thúc đẩy bởi lợi ích thương mại và nhu cầu xã hội. các nỗ lực nghiên cứu chủ yếu tập trung vào bốn lĩnh vực chính sau đây:

Pin và lưu trữ năng lượng

Với sự quan tâm ngày càng lớn đối với các công nghệ xanh, nghiên cứu về pin và lưu trữ năng lượng đang trở thành một lĩnh vực được chú trọng đáng kể từ góc độ thương mại. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu trong lĩnh vực này tập trung vào hai hướng chính:

• *Pin*: hoạt động nghiên cứu tiếp tục nhằm tối ưu hóa công nghệ pin lithium-ion truyền thống. Tuy nhiên, trước những hạn chế về công nghệ và nhu cầu ngày càng cao về mật độ năng lượng lớn hơn, nhiều hướng đi mới đang được thúc đẩy nhằm phát triển các công nghệ pin tiên tiến hơn. Bên cạnh đó, các vấn đề liên quan đến chi phí sản xuất, tác động môi trường và độ an toàn vận hành cũng được đặc biệt lưu ý. Nhiều công nghệ pin tiềm năng đang được nghiên cứu như pin AI-air, pin carbon kép, pin Li-CO_2, pin lithium-metal, pin magiê-lưu huỳnh, pin kali-ion, pin natri-metal và pin kẽm-ion. Trong đó, một số công nghệ hướng đến lưu trữ điện năng quy mô lớn, trong khi các công nghệ khác được thiết kế dành riêng cho phương tiện di chuyển, bao gồm cả các phương tiện phục vụ mục đích quân sự.

• *Tụ điện*: siêu tụ điện (tụ siêu dung) đang được xem như một giải pháp thay thế đầy hứa hẹn trong lĩnh vực lưu trữ năng lượng nhờ các ưu điểm nổi bật như trọng lượng nhẹ, độ an toàn cao, tuổi thọ dài, mật độ năng lượng tốt, tốc độ sạc nhanh và hạn chế các tác động tiêu cực đến môi trường. Tuy vậy, các rào cản công nghệ hiện tại vẫn là thách thức lớn đối với việc thương mại hóa trên diện rộng. Một hướng nghiên cứu tiềm năng đang được đẩy mạnh là phát triển pin lai siêu tụ - sự kết hợp giữa cơ chế lưu trữ điện hóa của pin với khả năng phóng điện nhanh của siêu tụ điện, mang đến triển vọng tạo ra các hệ thống lưu trữ năng lượng linh hoạt và hiệu quả hơn.

Sản xuất năng lượng

Sản xuất năng lượng sạch đóng vai trò quan trọng trong việc hiện thực hóa các mục tiêu đầy tham vọng về biến đổi khí hậu. Các nghiên cứu trong lĩnh vực này đang tập trung vào việc cải thiện hiệu suất, giảm chi phí sản xuất và phát triển các công nghệ tiên tiến nhằm nâng cao tính bền vững. Đặc biệt, các nguồn năng lượng tái tạo như địa nhiệt, năng lượng mặt trời, gió và thủy điện được ưu tiên phát triển nhằm từng bước thay thế nhiên liệu hóa thạch và hạn chế tác động tiêu cực đến môi trường.

Năng lượng tái tạo đang có những bước tiến quan trọng, trong đó năng lượng mặt trời ngày càng trở nên cạnh tranh hơn so với nhiên liệu hóa thạch nhờ những cải tiến về hiệu suất và chi phí sản xuất. Các hướng nghiên cứu nổi bật hiện nay tập trung vào tối ưu hóa sản xuất và ứng dụng công nghệ tấm pin mặt trời màng mỏng linh hoạt, sử dụng vật liệu hữu cơ không chứa fullerene. Nhờ đặc tính nhẹ, linh hoạt và hiệu quả, công nghệ

này hứa hẹn được tích hợp trong thiết bị đeo thông minh, quần áo phát điện hoặc cửa sổ năng lượng. Song song với đó, một giải pháp đột phá khác đang được thử nghiệm là công nghệ truyền tải năng lượng không dây từ vũ trụ, trong đó các vệ tinh quỹ đạo thu năng lượng mặt trời và truyền xuống Trái đất. Hệ thống này giúp giải quyết hạn chế về thời tiết và chu kỳ ngày - đêm, tuy nhiên vẫn đang trong giai đoạn phát triển và khó có thể ứng dụng rộng rãi trước năm 2030.

Ngoài ra, nhiên liệu sinh học cũng được xem là một giải pháp đầy triển vọng nhờ khả năng tận dụng cơ sở hạ tầng nhiên liệu hóa thạch hiện có, đồng thời duy trì đặc tính trung tính carbon. Bioethanol, biodiesel và biobutanol hiện có thể được sản xuất từ nhiều nguồn đa dạng như dầu ăn đã qua sử dụng, tảo, rong biển, côn trùng và các loại cây trồng thay thế. Đặc biệt, nghiên cứu sản xuất biodiesel từ ấu trùng ruồi lính đen đang thu hút sự quan tâm, khi phương pháp này cho phép chuyển hóa chất thải hữu cơ thành chất béo dùng làm nhiên liệu. Dù vậy, lĩnh vực nhiên liệu sinh học vẫn đối mặt với nhiều thách thức liên quan đến chi phí sản xuất, tác động môi trường, tiêu thụ nước, sử dụng đất, chất lượng nhiên liệu và mức độ tương thích với động cơ hiện hành.

Bên cạnh đó, hydro cũng được đánh giá là một lựa chọn tiềm năng thay thế nhiên liệu hóa thạch. Tuy nhiên, hạn chế lớn nhất hiện nay là phần lớn hydro vẫn được sản xuất từ nguồn hóa thạch, làm giảm tính bền vững của nó như một giải pháp năng lượng xanh toàn diện.

Năng lượng hạt nhân, đặc biệt là công nghệ phân hạch, những năm gần đây gặp phải nhiều tranh cãi do lo ngại về an toàn và rủi ro môi trường. Dẫu vậy, các nghiên cứu vẫn được duy trì với mục tiêu phát triển thế hệ lò phản ứng an toàn hơn, dễ vận hành và giảm nguy cơ phổ biến vũ khí hạt nhân. Trong số đó, lò phản ứng muối nóng chảy (MSR) sử dụng thorium đang nổi lên như một lựa chọn đầy hứa hẹn nhờ ưu điểm về độ an toàn và khả năng hạn chế phát sinh vật liệu phóng xạ nguy hiểm. Các loại nhiên liệu hạt nhân có khả năng chịu sự cố cũng đang được phát triển nhằm nâng cao độ an toàn cho các nhà máy điện hạt nhân tương lai.

Ở quy mô nhỏ, các lò phản ứng hạt nhân module nhỏ (SMR) đang được thiết kế để cung cấp năng lượng cho căn cứ quân sự, phục vụ các khu định cư ngoài Trái đất như trên Mặt trăng hoặc sao Hỏa, đồng thời hỗ trợ hệ thống đẩy nhiệt hạt nhân trong các nhiệm vụ thám hiểm không gian.

Truyền tải năng lượng

Sau khi được sản xuất, năng lượng được phân phối đến các điểm tiêu thụ, và đây cũng là lĩnh vực đang ghi nhận nhiều bước tiến nổi bật. Hiện nay, nghiên cứu trong truyền tải năng lượng tập trung vào hai hướng chính: công nghệ truyền tải không dây và phát triển lưới điện vi mô.

Truyền tải năng lượng không dây (WPT) được xem là một trong những giải pháp

đầy tiềm năng trong bối cảnh nhu cầu sử dụng các thiết bị điện tử di động ngày càng tăng. Công nghệ này đang mở rộng với nhiều phương thức khác nhau, bao gồm truyền điện cảm ứng, truyền điện dung, truyền tải động, truyền dẫn dưới nước và sạc không dây cho các thiết bị thông tin liên lạc. Những tiến bộ trong lĩnh vực WPT không chỉ giúp nâng cao hiệu quả cung cấp điện mà còn giảm bớt sự phụ thuộc vào hệ thống dây dẫn truyền thống, đồng thời mở ra nhiều ứng dụng giá trị trong lĩnh vực quân sự và dân sự.

Song song với đó, lưới điện vi mô đang ngày càng khẳng định vai trò quan trọng nhờ khả năng vận hành độc lập hoặc tương tác linh hoạt với lưới điện quốc gia, góp phần nâng cao tính chủ động, ổn định và phục hồi trong cung cấp điện. Đây được xem là giải pháp tối ưu để khai thác hiệu quả nguồn điện sản xuất tại chỗ, đặc biệt trong bối cảnh phát triển các nguồn năng lượng phân tán như năng lượng mặt trời hoặc gió. Tuy nhiên, một trong những thách thức kỹ thuật lớn nhất hiện nay của lưới vi mô là khả năng điều phối và đồng bộ hóa với lưới điện chính hoặc giữa các lưới vi mô khác nhau để duy trì tính ổn định, an toàn và hiệu quả vận hành.

Bên cạnh các ứng dụng dân sự, lưới điện vi mô còn được nghiên cứu và triển khai trong các mô hình đặc thù phục vụ mục đích quân sự, chẳng hạn như trên tàu chiến, căn cứ biệt lập hoặc các khu vực tiền phương. Trong vòng 10 năm tới, các hệ thống lưới vi mô lai - kết hợp nhiều nguồn năng lượng khác nhau - cũng sẽ tiếp tục được hoàn thiện nhằm đáp ứng yêu cầu khắt khe về độ tin cậy, bảo mật và khả năng hoạt động trong môi trường khắc nghiệt. Với những tiềm năng và yêu cầu kỹ thuật phức tạp, truyền tải năng lượng đang trở thành lĩnh vực thu hút sự quan tâm đặc biệt từ giới nghiên cứu và ngành công nghiệp điện lực toàn cầu.

Hệ thống đẩy

Việc cung cấp năng lượng và tạo động lực cho các phương tiện, đặc biệt trong lĩnh vực quân sự, luôn là một thách thức kỹ thuật xuyên suốt hơn ba thế kỷ qua. Tuy nhiên, xét trên góc độ công nghệ mới nổi, hiện nay có ba hướng phát triển đáng chú ý đang được ưu tiên nghiên cứu: điện khí hóa, động cơ hàng không tiên tiến và giải pháp vận hành xanh.

Điện khí hóa các phương tiện quân sự hiện vẫn ở giai đoạn sơ khai và đối mặt với không ít rào cản về kỹ thuật và vận hành. Tuy nhiên, trước làn sóng điện khí hóa mạnh mẽ trong lĩnh vực dân sự và công nghiệp, việc áp dụng động cơ điện cho phương tiện quân sự chỉ còn là vấn đề thời gian. Dự báo cho thấy quy mô thị trường điện khí hóa toàn cầu có thể tăng từ 4,8 tỷ USD năm 2020 lên 17,6 tỷ USD vào năm 2030. Sự phát triển nhanh chóng của phương tiện thương mại chạy điện đang thúc đẩy các bước tiến vượt bậc trong công nghệ pin, động cơ và các hệ thống điều khiển thông minh ứng dụng AI và ML. Những tiến bộ này sẽ tạo nền tảng để hiện thực hóa các giải pháp điện khí hóa

trong quốc phòng. Một số mẫu xe dân dụng như Tesla Cybertruck hay Tesla Semi đang được đánh giá cao về tiềm năng sử dụng trong môi trường quân sự, dù việc nhân rộng quy mô sản xuất và triển khai thực tế vẫn là bài toán kỹ thuật phức tạp.

Trong lĩnh vực hàng không, điện khí hóa cũng trở thành hướng nghiên cứu đầy triển vọng, với nhiều nguyên mẫu đã được thử nghiệm thành công và một số dòng máy bay gần bước vào giai đoạn sản xuất thương mại. Tuy nhiên, so với phương tiện mặt đất hay đường thủy, các thách thức về tải trọng, tầm bay và hiệu suất năng lượng đối với máy bay điện lớn hơn nhiều. Trong ngắn hạn, các mô hình lai - như hệ thống tuabin điện, máy bay tua-bin điện hoàn toàn và máy bay sử dụng hydro cho các chặng bay ngắn - đang được xem là những giải pháp khả thi nhất. Bên cạnh việc phát triển động cơ, các hệ thống đẩy thế hệ mới cần đồng bộ với thiết kế khí động học tiên tiến và các thuật toán điều khiển tối ưu. Đặc biệt, công nghệ kiểm soát dòng chảy chủ động đang thu hút sự chú ý, với khả năng điều chỉnh luồng khí động thông qua cơ chế phun hoặc hút chất lỏng từ các lỗ nhỏ trên bề mặt máy bay, giúp tăng đáng kể hiệu suất bay.

Trong không gian, các giải pháp đẩy như động cơ hạt nhân, hóa học, điện và năng lượng mặt trời đang liên tục được cải tiến nhằm tối ưu hóa chi phí vận hành, độ bền, độ tin cậy và thời gian hoàn thành nhiệm vụ. Đáng chú ý, công nghệ động cơ hạt nhân được kỳ vọng sẽ đóng vai trò quan trọng trong các nhiệm vụ ngoài quỹ đạo Trái đất - Mặt trăng. Một số phương án đang được phát triển bao gồm động cơ nhiệt hạt nhân, sử dụng lò phản ứng để làm nóng nhiên liệu đẩy và động cơ phân hạch hạt nhân nhằm phục vụ các chuyến bay kéo dài. Ngoài ra, động cơ đẩy điện hút khí - vốn tận dụng lớp khí quyển loãng ở quỹ đạo rất thấp quanh Trái đất - cũng đang được nghiên cứu với tiềm năng ứng dụng trong tương lai gần.

Một hướng đi nổi bật khác trong phát triển hệ thống đẩy là công nghệ động cơ chu trình kết hợp, mang đến triển vọng hiện thực hóa các chuyến bay siêu thanh có người lái với chi phí hợp lý. Công nghệ này tích hợp linh hoạt giữa động cơ tuabin phản lực để hoạt động ở tốc độ thấp và động cơ phản lực tĩnh siêu âm khi đạt đến vận tốc cao. Mặc dù vẫn đang trong quá trình nghiên cứu và thử nghiệm, động cơ chu trình kết hợp được đánh giá có tiềm năng ứng dụng lớn, đặc biệt trong các nhiệm vụ quân sự chiến lược và các chương trình thám hiểm không gian dài hạn.

Bảng 2.6. Năng lượng và hệ thống đẩy, 2023-2043

Lĩnh vực trọng tâm	Tác động	TRL	Giai đoạn dự kiến
Sản xuất năng lượng	Cao	5 - 6	2025 - 2030
Lưu trữ năng lượng	Cao	5 - 6	2030 - 2035
Hệ thống đẩy	Cao	5 - 6	2025 - 2030
Truyền tải	Cao	5 - 6	2025 - 2030

Nguồn: NATO (2023), Science & Technology Trends 2023 - 2043.

2.7. Điện tử và điện từ (E&EM)

Công nghệ điện tử và điện từ tập trung vào sự phát triển của các hệ thống điện tử và các công nghệ liên quan đến phổ điện từ. Tiến bộ công nghệ trong lĩnh vực này phụ thuộc vào sự đổi mới trong thiết bị điện tử thế hệ mới và khả năng kiểm soát phổ điện từ hiệu quả hơn.

Định luật Moore đã minh chứng cho khả năng mở rộng quy mô của điện tử dựa trên silicon, với số lượng bóng bán dẫn trong vi mạch tăng gấp đôi sau mỗi hai năm. Tuy nhiên, sự mở rộng này đang dần chạm đến các giới hạn vật lý và được dự báo sẽ gặp trở ngại nghiêm trọng trong vòng 10 năm tới. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết về việc NC&PT các hệ thống điện tử mới dựa trên những khái niệm, công cụ, vật liệu và thiết kế tiên tiến. Trong thập kỷ tới, ngành công nghiệp bán dẫn vẫn sẽ tiếp tục tinh chỉnh và tối ưu hóa công nghệ silicon, nhưng đồng thời cũng đang hướng tới những bước đột phá lớn hơn thông qua các công nghệ mới như vật liệu thay thế, kiến trúc bộ nhớ - tính toán kết hợp, công nghệ spintronics, chất cách điện tô-pô, vật liệu thay đổi pha, mạch lượng tử ion bẫy, quang tử, cũng như thiết kế chip thần kinh hỗ trợ bởi AI.

Bên cạnh đó, vấn đề an ninh điện tử ngày càng trở nên quan trọng. Việc tích hợp các cơ chế bảo mật ngay từ khâu thiết kế là cần thiết để bảo đảm một môi trường tính toán an toàn trên không gian mạng, đặc biệt trong bối cảnh các hệ thống AI, IoT và điện toán lượng tử ngày càng phát triển.

Ở lĩnh vực điện từ, cuộc cạnh tranh về kiểm soát và khai thác phổ tần ngày càng gay gắt. Nhu cầu tối ưu hóa việc sử dụng phổ điện từ không ngừng tăng, kéo theo sự phát triển của các công nghệ như radio nhận thức, quản lý tần số tự động và các giải pháp mới trong chiến tranh điện tử nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng phổ, đồng thời đối phó với các mối đe dọa an ninh ngày càng tinh vi.

Nhìn chung, tiến bộ công nghệ trong nhiều lĩnh vực đột phá phụ thuộc sâu sắc vào khả năng phát triển các linh kiện điện tử thế hệ mới và các phương thức kiểm soát phổ điện từ hiệu quả. Một trong những thách thức trọng yếu hiện nay là vượt qua giới hạn của vật liệu điện tử truyền thống - điển hình như silicon - để mở ra không gian sáng tạo cho các công nghệ bán dẫn thế hệ kế tiếp.

Trong 20 năm tới, những phát triển quan trọng sẽ tập trung vào các lĩnh vực sau:

Điện tử tiên tiến và điện từ học

Sự phát triển của các hệ thống điện tử đang dần tiến gần tới giới hạn vật lý của silicon, dẫn đến những rào cản ngày càng rõ rệt đối với việc duy trì định luật Moore và làm chậm lại tốc độ đổi mới công nghệ trong nhiều lĩnh vực. Các hướng nghiên cứu mới đang được đẩy mạnh nhằm vượt qua các giới hạn hiện tại, với ba trọng tâm chính: phát triển vật liệu

thế hệ mới, cải tiến kiến trúc hệ thống và tối ưu hóa thiết kế chip.

Trước hết, nghiên cứu vật liệu đang tập trung vào việc phát triển các chất liệu thay thế silicon nhằm phục vụ cho thế hệ chip logic và bộ nhớ tiếp theo. Các phương pháp tính toán phi truyền thống cũng được thử nghiệm dựa trên những đặc tính đặc biệt của vật liệu mới như khả năng hoạt động ở nhiệt độ cực thấp hoặc tính chất bán dẫn vượt trội, qua đó nâng cao hiệu suất và giảm tiêu thụ năng lượng. Nhiều vật liệu tiềm năng như vật liệu hai chiều (2D materials), GaAs (Gallium Arsenide), SiC (Silicon Carbide) và GaN (Gallium Nitride) đang được nghiên cứu với kỳ vọng không chỉ giảm điện năng tiêu thụ và hạn chế nhiễu mà còn tối ưu hóa khả năng tản nhiệt và thu nhỏ kích thước linh kiện. Nhiều quốc gia, đặc biệt là Trung Quốc, đang tập trung đầu tư mạnh mẽ vào lĩnh vực này nhằm tạo ra những bước tiến đột phá trong công nghệ bán dẫn.

Song song với phát triển vật liệu, cải tiến kiến trúc hệ thống cũng là hướng đi quan trọng nhằm nâng cao hiệu suất ngay cả khi vẫn sử dụng bóng bán dẫn silicon. Việc thiết kế lại cấu trúc mạch ở cấp độ chip và bảng mạch có thể giúp tối ưu hóa hiệu suất xử lý, giảm chi phí sản xuất và hạn chế sinh nhiệt. Đặc biệt, việc ứng dụng AI và ML vào quá trình thiết kế vi mạch chuyên dụng đang mở ra nhiều cơ hội mới để cải thiện hiệu quả năng lượng và tăng tốc độ xử lý. Các xu hướng nghiên cứu đáng chú ý gồm điện toán mô phỏng sinh học, điện toán lấy cảm hứng từ cấu trúc não bộ và điện toán siêu chiều, góp phần mở rộng giới hạn xử lý dữ liệu và tối ưu hóa hiệu suất tổng thể của hệ thống.

Cuối cùng, tối ưu hóa thiết kế chip tiếp tục giữ vai trò then chốt trong việc nâng cao hiệu suất hệ thống điện tử. Các nghiên cứu hiện nay đang khai thác khả năng của AI/ML để tự động hóa và tối ưu hóa quy trình thiết kế cũng như bố trí chip, giúp hình thành các kiến trúc bán dẫn thế hệ mới với hiệu quả cao hơn. Hướng tiếp cận này không chỉ mở rộng không gian sáng tạo trong thiết kế mà còn thúc đẩy xu hướng "dân chủ hóa" công nghệ bán dẫn, khiến việc phát triển các vi mạch tiên tiến trở nên phổ biến và dễ tiếp cận hơn. Thậm chí, nhiều thiết kế chip có thể được công bố dưới dạng mã nguồn mở, từ đó khuyến khích hợp tác, chia sẻ tri thức và đẩy nhanh tốc độ đổi mới trong lĩnh vực bán dẫn toàn cầu.

Ăng-ten

Trong bối cảnh các hệ thống liên lạc và cảm biến ngày càng được thu nhỏ, các yếu tố SWaP-C trở thành ưu tiên hàng đầu trong thiết kế và phát triển công nghệ. Tuy nhiên, việc tối ưu hóa ăng-ten không chỉ gặp giới hạn về mặt vật lý mà còn phải đối mặt với những thách thức phát sinh từ môi trường hoạt động khắc nghiệt và dễ bị tổn thương. Điều này đã thúc đẩy nhu cầu nghiên cứu các thiết kế ăng-ten tiên tiến nhằm nâng cao hiệu suất và khả năng thích ứng trong nhiều điều kiện khác nhau.

Bên cạnh những tiến bộ đáng kể đã đạt được, một số hướng nghiên cứu tiềm năng nhưng ít được chú ý hiện nay đang mở ra cơ hội lớn cho các ứng dụng trong tương lai,

bao gồm:

• Bộ phát ULF/VLF: các dải tần số siêu thấp (ULF: 0,3 - 3 kHz) và rất thấp (VLF: 3 - 30 kHz) đặc biệt quan trọng đối với liên lạc trong môi trường trong lòng đất hoặc dưới nước. Do bước sóng cực lớn, các hệ thống ăng-ten truyền thống ở các dải tần này thường có kích thước khổng lồ, kéo dài hàng kilomet. Để khắc phục hạn chế này, các nghiên cứu mới đang tập trung vào việc ứng dụng cơ chế điều chỉnh trường điện và từ trường bằng chuyển động cơ học, qua đó thu nhỏ đáng kể kích thước ăng-ten xuống còn khoảng 1 mét. Phương pháp này mở ra khả năng thiết lập các hệ thống liên lạc nhỏ gọn, hiệu quả trong những điều kiện khắc nghiệt như địa tầng sâu hoặc môi trường biển sâu.

• Ăng-ten băng rộng: việc phát triển các thiết kế ăng-ten UWB mang lại lợi thế quan trọng trong các hệ thống liên lạc quân sự nhờ khả năng hoạt động trên dải tần rộng, giúp giảm thiểu nhiễu và tăng khả năng chống lại các biện pháp gây nhiễu hoặc tấn công điện tử. Thông qua việc tối ưu hóa hiệu suất phát và nhận tín hiệu trên phổ tần rộng, công nghệ này giúp bảo đảm độ tin cậy và bảo mật cao cho các hệ thống thông tin trong môi trường tác chiến phức tạp.

• Mảng ăng-ten 4D: đây là xu hướng phát triển các mảng ăng-ten có khả năng tái cấu hình động, cho phép linh hoạt kích hoạt hoặc vô hiệu hóa từng phần tử ăng-ten tùy vào nhu cầu sử dụng. Công nghệ này giúp tạo ra các biên dạng tín hiệu đặc biệt, hỗ trợ truyền thông đa kênh và ứng dụng các thuật toán tạo chùm tia thông minh (smart beamforming). Nhờ đó, hiệu suất truyền và nhận tín hiệu được cải thiện đáng kể, khả năng tập trung tín hiệu vào mục tiêu cụ thể được tăng cường, đồng thời mang lại sự linh hoạt cao cho các hệ thống radar và liên lạc hiện đại.

Những đổi mới trong thiết kế ăng-ten góp phần nâng cao hiệu quả hoạt động của các hệ thống liên lạc và cảm biến, đồng thời mở rộng ứng dụng trong các lĩnh vực chiến lược như quốc phòng, nghiên cứu KH&CN viễn thông tiên tiến, đáp ứng nhu cầu ngày càng cao về hiệu suất, độ tin cậy và tính thích ứng trong các môi trường phức tạp.

Quang tử và Laser

Quang tử - lĩnh vực nghiên cứu về kiểm soát và khai thác ánh sáng để truyền tải và xử lý thông tin - đã phát triển thành một ngành khoa học vững chắc với nhiều ứng dụng quan trọng trong đời sống và công nghệ. Dù đã đạt được những thành tựu đáng kể, quang tử vẫn tiếp tục mở ra những hướng nghiên cứu đầy tiềm năng, đặc biệt là các đột phá trong điện toán lượng tử và các hệ thống thông tin thế hệ mới. Hiện nay, các nghiên cứu vật lý ứng dụng vẫn đang tập trung làm sáng tỏ các nguyên lý quang tử cơ bản, đồng thời khám phá cách thức tương tác giữa ánh sáng và vi mạch tích hợp để phục vụ các ứng dụng như truyền thông tốc độ cao, xử lý tín hiệu, cảm biến quang phổ và công nghệ hình ảnh hóa tiên tiến.

Một trong những hướng phát triển nổi bật của lĩnh vực này là quang tử silicon – công

nghệ điều khiển ánh sáng trên nền tảng chip silicon thay vì sử dụng dòng điện tử như trong các vi mạch truyền thống. Quang tử silicon được kỳ vọng sẽ mang lại những bước tiến vượt trội về hiệu quả năng lượng, chi phí sản xuất, tốc độ xử lý, dung lượng truyền tải và khả năng mở rộng hệ thống. Để hiện thực hóa tiềm năng đó, công nghệ này vẫn phải đối mặt với nhiều thách thức kỹ thuật phức tạp trong quá trình chế tạo và vận hành. Một số hướng nghiên cứu trọng tâm hiện nay tập trung vào việc cải thiện tín hiệu quang học, phát triển các mô hình quang tử mô phỏng hoạt động não bộ, nghiên cứu về quang từ học và khám phá các hiện tượng quang tử tô-pô để mở rộng ứng dụng thực tế.

Song song với sự phát triển của quang tử, công nghệ laser cũng đang ghi nhận những bước tiến đáng kể, đặc biệt khi laser đóng vai trò nền tảng trong nhiều hệ thống quang học và truyền thông hiện đại. Các hướng nghiên cứu nổi bật bao gồm phát triển các nguồn quang tử bức xạ nhỏ gọn, thiết kế nano-laser (các thiết bị laser tích hợp trên chip), cùng với các giải pháp tối ưu hóa SWaP-C cho hệ thống laser quang học không gian tự do. Những công nghệ tiên tiến này không chỉ giúp nâng cao hiệu suất truyền dẫn quang học mà còn mở rộng phạm vi ứng dụng của laser trong các lĩnh vực như viễn thông, cảm biến quang học chính xác cao, và các hệ thống điện toán hiệu năng cao.

Với sự hội tụ giữa quang tử và laser, các nghiên cứu hiện nay đang góp phần định hình thế hệ công nghệ quang học mới, đáp ứng nhu cầu ngày càng cao về tốc độ, độ tin cậy và hiệu quả trong truyền thông, xử lý dữ liệu và các giải pháp cảm biến thông minh trong tương lai.

Phổ điện từ

Phổ điện từ đang ngày càng trở thành một môi trường cạnh tranh chiến lược và thương mại hóa mạnh mẽ trên toàn cầu. Khi công nghệ 5G đã được triển khai rộng rãi, thế hệ tiếp theo - 6G - được kỳ vọng sẽ trở thành nền tảng kỹ thuật số chủ chốt không chỉ trong lĩnh vực thương mại mà còn đóng vai trò quan trọng trong các hoạt động quân sự hiện đại. Tuy nhiên, sự cạnh tranh gay gắt giữa các quốc gia và sự khác biệt trong tiêu chuẩn công nghệ đang tạo ra những áp lực đáng kể đối với việc phân bổ, quản lý và khai thác phổ điện từ hiệu quả, đặc biệt trong môi trường thương mại có tính toàn cầu cao.

Bên cạnh đó, trong bối cảnh chiến tranh công nghệ cao, việc kiểm soát phổ điện từ vẫn giữ vai trò then chốt, quyết định khả năng giành ưu thế trên chiến trường thông tin. Khả năng tận dụng phổ điện từ hiệu quả không chỉ giúp tăng cường năng lực tác chiến mà còn hạn chế đối phương tiếp cận và sử dụng nguồn tài nguyên chiến lược này. Trước nhu cầu đó, hoạt động nghiên cứu và phát triển công nghệ liên quan đến phổ điện từ đang gia tăng mạnh mẽ, với nhiều hướng đi triển vọng, tiêu biểu như:

- Ngụy trang thích ứng: đây là công nghệ cho phép điều chỉnh tín hiệu quang học và gần quang học phát ra từ phương tiện, con người hoặc cơ sở hạ tầng nhằm hòa nhập với môi trường xung quanh. Các hệ thống ngụy trang hiện đại có thể hoạt động

đồng thời trên nhiều dải phổ khác nhau, giúp thay đổi hoặc che giấu dấu hiệu phát xạ trên nhiều kênh phổ điện từ cùng lúc. Nhờ đó, chúng hỗ trợ hiệu quả cho các chiến dịch tác chiến bí mật, phòng thủ điện tử và gây nhiễu các hệ thống quan sát của đối phương.

- Ưu thế tần số cao - công suất cao: việc phát triển các bộ khuếch đại công suất lớn cho sóng milimet (mmWave) ở các dải tần số cao đang mở ra những vùng phổ ít bị tranh chấp hơn. Không chỉ phục vụ truyền thông dữ liệu tốc độ cao, công nghệ này còn giúp tăng độ nhạy và cải thiện độ phân giải của nhiều loại cảm biến. Nhờ đó, hiệu suất của các hệ thống radar, vệ tinh giám sát và mạng lưới liên lạc quân sự được nâng cao đáng kể, củng cố ưu thế trong giám sát và phòng thủ từ xa.
- Quản lý phổ thích ứng: với sự hỗ trợ của AI và ML, các hệ thống radio nhận thức và cảm biến thông minh đang được phát triển để tự động thích ứng với sự thay đổi liên tục trong môi trường phổ điện từ. Những công nghệ này không chỉ tối ưu hóa việc sử dụng phổ tần trong cả hoạt động thương mại và quân sự mà còn tăng cường năng lực chống nhiễu, bảo đảm thông tin liên lạc ổn định và an toàn. Chúng đặc biệt hữu ích trong các lĩnh vực như radar, tình báo tín hiệu, chiến tranh điện tử và các hệ thống thông tin chiến thuật.

Với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ, việc tối ưu hóa và kiểm soát phổ điện từ sẽ tiếp tục là yếu tố mang tính quyết định trong cạnh tranh công nghệ và chiến lược toàn cầu thời gian tới.

Vũ khí năng lượng định hướng (DEW)

Nhận thức về vai trò của các hình thức xung đột phi động năng trong chiến tranh hiện đại ngày càng gia tăng, đặc biệt khi các cuộc đối đầu dựa trên hiệu ứng năng lượng và tác động phi truyền thống trở thành xu hướng chủ đạo. Trong bối cảnh đó, DEW - dù không phải là công nghệ hoàn toàn mới - đang bước vào giai đoạn phát triển vượt bậc, với mức độ hoàn thiện kỹ thuật ngày càng cao và nhu cầu ứng dụng tăng mạnh trên toàn cầu. Các hệ thống laser công suất cao và vũ khí vi sóng đang nổi lên như những công cụ tác chiến đột phá, được kỳ vọng sẽ được triển khai rộng rãi trên nhiều chiến trường trong tương lai gần.

Theo ước tính, thị trường DEW toàn cầu hiện đạt quy mô khoảng 14,3 tỷ USD và dự kiến sẽ tăng lên 72,1 tỷ USD vào năm 2027. Sự tăng trưởng này được thúc đẩy bởi hàng loạt tiến bộ công nghệ, nổi bật là các đột phá trong lưu trữ năng lượng, AI, ML và vật liệu tiên tiến. Nhiều hệ thống DEW đã đạt tới mức độ sẵn sàng công nghệ cao, với một số đã được tích hợp và triển khai trực tiếp trong các chiến dịch thực tế, cho thấy tiềm năng lớn về hiệu quả chiến đấu.

Cùng với giá trị chiến lược ngày càng rõ nét, DEW cũng đang đối mặt với không ít thách thức về kỹ thuật, vận hành và hậu cần. Tuy nhiên, chính sự xuất hiện ngày càng nhiều của DEW trong các cuộc thử nghiệm, diễn tập quy mô lớn đã khẳng định vị thế

trọng yếu của loại vũ khí này trong học thuyết tác chiến mới. Với đà phát triển mạnh mẽ hiện nay, DEW được dự báo sẽ góp phần định hình lại phương thức tiến hành chiến tranh trong tương lai, khi các hệ thống năng lượng định hướng có thể trở thành nhân tố quyết định trong việc giành ưu thế trên chiến trường hiện đại.

Bảng 2.7. Điện tử và điện từ, 2023-2043.

Lĩnh vực trọng tâm	Tác động	TRL	Giai đoạn dự kiến
Ăng-ten	Cao	9	2022-2025
Vũ khí năng lượng định hướng	Cao	5-6	2030-2035
Vi điện tử	Cao	9	2022-2025
Quang tử và Laser	Cao	7-8	2025-2030
Quản lý phổ và chữ ký	Cao	5-6	2025-2030

Nguồn: NATO (2023), Science & Technology Trends 2023-2043.

III. CÁC CÔNG NGHỆ MỚI NỔI

3.1. Công nghệ lượng tử

Công nghệ lượng tử thế hệ mới khai thác các nguyên lý vật lý lượng tử và các hiện tượng ở quy mô nguyên tử và hạ nguyên tử, đặc biệt là rối lượng tử và chồng chập lượng tử. Những hiệu ứng này đang thúc đẩy những bước tiến công nghệ đáng kể, đặc biệt trong các lĩnh vực mật mã, tính toán, điều hướng và định thời chính xác, cảm biến và hình ảnh, thông tin liên lạc, cũng như nghiên cứu vật liệu.

Cơ học lượng tử, ra đời từ đầu thế kỷ XX, đã đóng vai trò nền tảng trong việc mô tả hành vi của vật chất ở cấp độ dưới 10nm. Nhiều công nghệ hiện đại như bóng bán dẫn, năng lượng hạt nhân, kính hiển vi điện tử, siêu dẫn, cảm biến quang điện, chụp ảnh y tế (MRI, PET), laser và các thiết bị bán dẫn đều dựa trên các hiện tượng lượng tử. Tuy nhiên, những công nghệ này chủ yếu khai thác các quy tắc lượng tử mà không kiểm soát trực tiếp từng trạng thái lượng tử riêng lẻ.

Việc chủ động thiết kế, thao tác và kiểm soát trạng thái lượng tử đã dẫn đến sự ra đời của cuộc cách mạng lượng tử thứ hai, khởi đầu từ những năm 1980. Các công nghệ lượng tử thế hệ thứ hai này tận dụng rối lượng tử và chồng chập, mở ra những tiềm năng mang tính cách mạng trong các lĩnh vực quốc phòng, an ninh và công nghệ thông tin. Hiện nay, NC&PT trong lĩnh vực này đang tập trung vào các ứng dụng như cảm biến siêu nhạy, hệ thống định vị, dẫn đường và đồng bộ thời gian (PNT), thông tin liên lạc bảo mật và điện toán lượng tử. Những tiến bộ này đang tạo ra những công nghệ tiên tiến như đồng hồ siêu chính xác, mã hóa lượng tử không thể bẻ khóa và khả năng tính toán vượt trội cho một số bài toán phức tạp.

Trong số các EDT, công nghệ lượng tử vẫn là lĩnh vực non trẻ nhất với tốc độ phát

triển biến động lớn. Sự quan tâm và đầu tư mạnh mẽ từ chính phủ và khu vực thương mại đang thúc đẩy những bước tiến quan trọng, đặc biệt là trong việc kiểm chứng tính khả thi của cảm biến lượng tử trong môi trường thực tế. Dù vẫn ở cấp độ sẵn sàng công nghệ thấp hơn so với các ứng dụng lượng tử khác, lĩnh vực này hứa hẹn sẽ tạo ra đột phá trong tương lai. Trong khi đó, các công nghệ như PNT và phân phối khóa lượng tử (QKD) đang dần đạt đến giai đoạn triển khai thực tế.

Các công nghệ lượng tử hiện nay được phân chia thành ba lĩnh vực chính, có sự giao thoa chặt chẽ và hứa hẹn sẽ định hình tương lai của KH&CN:

Điện toán lượng tử

Điện toán lượng tử là một lĩnh vực quan trọng của Khoa học thông tin lượng tử (QIS), bao gồm NC&PT về máy tính lượng tử, thuật toán, mật mã, ngôn ngữ lập trình, mô hình hóa, mô phỏng và ứng dụng tri thức. Các nghiên cứu trong lĩnh vực này tập trung vào sửa lỗi lượng tử, giảm nhiễu, cải tiến cổng logic và khám phá các công nghệ qubit mới. Những tiến bộ trong quang tử và bán dẫn đang mở ra cơ hội phát triển máy tính lượng tử hoạt động ở nhiệt độ phòng, giúp giảm bớt các yêu cầu kỹ thuật phức tạp.

Hiện nay, nhiều công ty đặt mục tiêu phát triển hệ thống hàng nghìn qubit vào năm 2023 và mở rộng lên hàng triệu qubit vào năm 2029. Một trong những xu hướng đáng chú ý là ML lượng tử cùng với việc nhiều doanh nghiệp bắt đầu cung cấp quyền truy cập miễn phí (nhưng giới hạn) vào các tài nguyên điện toán lượng tử.

Mặc dù điện toán lượng tử dựa trên một nền tảng vật lý vững chắc, nhưng các khái niệm của nó lại phi trực giác và đi kèm với những thách thức kỹ thuật phức tạp. Trung Quốc, Google, IBM cùng nhiều quốc gia đang đầu tư mạnh mẽ vào cuộc đua lượng tử, hướng đến cả máy tính lượng tử chuyên biệt (như tối ưu hóa bằng ủ lượng tử) lẫn máy tính lượng tử đa dụng, có thể thể hiện ưu thế rõ ràng so với siêu máy tính cổ điển.

Trong hai năm qua, số lượng qubit khả dụng đã tăng từ 54 lên 433, với các hệ thống trên 1000 qubit dự kiến ra mắt trong năm tới và tham vọng phát triển hệ thống hàng triệu qubit vào năm 2030. Mặc dù đây là những thành tựu ấn tượng, điện toán lượng tử vẫn phải đối mặt với vấn đề mở rộng quy mô, nhiễu, nhiễu xuyên kênh, độ ổn định và khả năng thương mại hóa. Việc đạt được hệ thống một triệu qubit có thể giải quyết các bài toán thực tế vẫn còn là một thách thức dài hạn.

Sự gia tăng đầu tư mạnh mẽ vào công nghệ lượng tử cũng đặt ra câu hỏi về tính bền vững dài hạn. Trong bối cảnh kinh tế hiện tại, một số chuyên gia lo ngại rằng ngành này có thể rơi vào "mùa đông lượng tử" - tức là sự sụt giảm đầu tư và quan tâm khi công nghệ không đáp ứng được kỳ vọng thương mại. Ngoài ra, sự cường điệu hóa xung quanh điện toán lượng tử có thể không mang lại lợi ích cho nghiên cứu cơ bản, thay vào đó lại thúc đẩy quá trình thương mại hóa vội vàng, làm chậm đi sự mở rộng hiểu biết thực sự về cơ học lượng tử.

Tuy nhiên, các hướng tiếp cận mới như hệ thống trống nitơ (nitrogen-vacancy) và quang tử, thay vì bẫy ion hoặc qubit siêu dẫn, đang hứa hẹn mang lại các hệ thống ổn định hơn và quy mô lớn hơn. Ngay cả khi "mùa đông lượng tử" xảy ra, máy tính lượng tử vẫn có tiềm năng phát triển thành một công nghệ ứng dụng thực tế, dù có thể mất nhiều thời gian hơn so với dự báo hiện tại là 10 năm.

Vẫn chưa rõ điện toán lượng tử sẽ tiến xa đến mức nào hoặc liệu nó có lặp lại quỹ đạo của năng lượng nhiệt hạch - luôn bị trì hoãn thêm 20 năm. Ngoài ra, có một rủi ro đáng kể khi nhận ra rằng điện toán lượng tử không phải là giải pháp cho mọi vấn đề, mà chỉ có thể mang lại lợi thế trong một số bài toán và thuật toán nhất định. Thậm chí, các ứng dụng được kỳ vọng từ lâu như mô hình hóa vật liệu vẫn chưa đạt được kết quả đáng kể. Vì vậy, đầu tư vào máy tính lượng tử không nên thay thế mà nên bổ sung cho đầu tư vào công nghệ siêu máy tính truyền thống. Nếu điện toán lượng tử thành công, nó nhiều khả năng sẽ hoạt động như một bộ đồng xử lý chuyên dụng trong hệ thống siêu máy tính, thay vì thay thế hoàn toàn phương pháp tính toán truyền thống.

Thông tin liên lạc lượng tử

Công nghệ thông tin liên lạc lượng tử đang phát triển với tốc độ nhanh chóng, trái ngược với máy tính lượng tử. Các hệ thống thực tế trên mặt đất và trong không gian đã được thử nghiệm, nhiều rào cản kỹ thuật trong lĩnh vực này đang dần được khắc phục. Điều này mở ra tiềm năng xây dựng một mạng truyền thông toàn cầu có độ bảo mật vượt trội.

Tuy nhiên, không phải tất cả các chuyên gia đều coi đây là một bước tiến cần thiết. Một số tổ chức, bao gồm Bộ Quốc phòng Hoa Kỳ, cho rằng việc phát triển công nghệ thông tin liên lạc lượng tử là không cấp thiết, bởi các phương pháp bảo mật truyền thống đã đủ đáng tin cậy ngay cả trong kỷ nguyên hậu điện toán lượng tử. Các kỹ thuật mã hóa hậu lượng tử (PQC) thế hệ mới đã được phát triển và đang chờ kiểm chứng, chuẩn hóa và triển khai rộng rãi. Nếu những thuật toán này được chứng minh là không thể bị phá vỡ bởi cả máy tính cổ điển lẫn lượng tử, thì thông tin liên lạc lượng tử có thể chỉ đóng vai trò bổ sung thay vì thay thế hoàn toàn các hệ thống bảo mật hiện tại. Bên cạnh đó, do những hạn chế kỹ thuật và chi phí cao, mạng thông tin liên lạc lượng tử nhiều khả năng sẽ chỉ hoạt động song song với các mạng truyền thống, thay vì thay thế hoàn toàn chúng.

Internet lượng tử được kỳ vọng sẽ tận dụng cả máy tính lượng tử và mạng thông tin liên lạc lượng tử để tạo ra một hệ thống truyền dữ liệu siêu nhanh với mức độ bảo mật cao chưa từng có. Tuy nhiên, một số chuyên gia vẫn xem đây là một giải pháp dành cho một vấn đề chưa thực sự được đặt ra rõ ràng.

Dự đoán, Internet lượng tử có thể đóng vai trò quan trọng trong việc xử lý dữ liệu lớn trong vòng 20 năm tới. Tuy nhiên, do sự phụ thuộc lớn vào máy tính lượng tử, sự phát triển của nó vẫn chưa chắc chắn và có thể bị trì hoãn bởi những hạn chế hiện tại

trong công nghệ lượng tử.

Lĩnh vực thông tin liên lạc và mật mã lượng tử, thường được xem là một nhánh của Khoa học thông tin lượng tử (QIS), đang NC&PT nhiều công nghệ nhằm bảo đảm thông tin liên lạc siêu bảo mật, bao gồm phát hiện xâm nhập và giảm khả năng bị chặn tín hiệu. Một số công nghệ đang dần đạt mức độ hoàn thiện gồm phân phối khóa lượng tử (QKD), một phương pháp trao đổi khóa bảo mật dựa trên các nguyên lý lượng tử giúp chống lại các cuộc tấn công nghe lén và bộ tạo số ngẫu nhiên lượng tử (QRNG), công nghệ tạo ra các số ngẫu nhiên thực sự, cung cấp nền tảng vững chắc cho hệ thống mã hóa mạnh hơn.

Bên cạnh các phương pháp liên lạc lượng tử, các thuật toán mã hóa hậu lượng tử cũng đang được nghiên cứu để bảo đảm an toàn ngay cả khi các kênh truyền dữ liệu không hoàn toàn bảo mật. Một ví dụ đáng chú ý là phương pháp trao đổi khóa Diffie-Hellman dựa trên đẳng cấu siêu suy biến (SIDH), một kỹ thuật mã hóa hứa hẹn khả năng bảo vệ dữ liệu khỏi các cuộc tấn công lượng tử.

Ngoài ra, thông tin liên lạc lượng tử còn được xem là một yếu tố quan trọng trong sự phát triển của công nghệ 6G, hứa hẹn mang lại những cải tiến vượt trội về tốc độ, bảo mật và khả năng kết nối trong tương lai.

Cảm biến lượng tử

Trong số tất cả các công nghệ lượng tử, cảm biến lượng tử là lĩnh vực phát triển mạnh mẽ nhất, cho phép đo lường chính xác các đại lượng vật lý như mức năng lượng nguyên tử, trạng thái quang tử và spin. Đặc biệt, các cảm biến lượng tử có thể vượt trội đáng kể so với các cảm biến truyền thống, với độ chính xác cao vượt trội, giúp lập bản đồ từ trường, điện trường và trường hấp dẫn với độ phân giải cực kỳ chi tiết. Tuy nhiên, các thách thức liên quan đến SWaP-C vẫn là một rào cản lớn, hạn chế khả năng triển khai rộng rãi của công nghệ này.

Một số cảm biến lượng tử tiêu biểu gồm: đồng hồ nguyên tử, ứng dụng trong PNT, mạng lưới và đo lường chính xác; giao thoa kế nguyên tử, được sử dụng trong trọng lực kế và gia tốc kế; từ kế quang học, ứng dụng trong khoa học sinh học, nghiên cứu Trái đất, tác chiến chống ngầm và điều hướng; công nghệ quang tử lượng tử, đóng vai trò quan trọng trong cảm biến cục bộ và từ xa, mạng lưới và nghiên cứu khoa học cơ bản; và cảm biến điện trường nguyên tử, giúp phát hiện bức xạ trong dải GHz-THz.

Sự phát triển của cảm biến lượng tử đang diễn ra mạnh mẽ trong nhiều lĩnh vực như điện từ, trọng lực, chụp ảnh, radar và từ trường. Những tiến bộ này đặc biệt quan trọng trong ngắn hạn đối với các ứng dụng như phát hiện thủy lôi hải quân và tác chiến chống ngầm. Một trong những mục tiêu dài hạn đầy tham vọng của lĩnh vực cảm biến lượng tử là LiDAR (phát hiện và đo khoảng cách bằng ánh sáng), mở ra tiềm năng cách mạng hóa

công nghệ cảm biến. Dù công nghệ LiDAR lượng tử vẫn đang trong giai đoạn nghiên cứu, các phát triển trong lĩnh vực này có thể mang lại lợi ích trong ngắn hạn, đặc biệt trong quốc phòng và hàng không vũ trụ.

Một ứng dụng đặc biệt quan trọng là hệ thống PNT. Dự báo, thị trường PNT sẽ đạt 200 triệu USD vào năm 2024 và nghiên cứu phát triển trong lĩnh vực này vẫn đang tiếp tục. Tuy nhiên, SWaP-C vẫn là yếu tố then chốt, đặc biệt trong việc tích hợp cảm biến lượng tử vào các UxV và nền tảng điều hướng quân sự quy mô lớn.

Đáng chú ý, đã có những bước tiến đáng kể trong việc phát triển cảm biến lượng tử có thể triển khai thực tế, mở ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong cả lĩnh vực quân sự và dân sự. Những tiến bộ này không chỉ giúp nâng cao năng lực chiến lược mà còn thúc đẩy nhiều cải tiến trong công nghệ thương mại, mang lại lợi ích dài hạn cho nhiều ngành công nghiệp.

Bảng 3.1. Công nghệ lượng tử, 2023-2043

Lĩnh vực trọng tâm	Tác động	TRL	Giai đoạn dự kiến
Thông tin liên lạc	Cao	3-4	2030-2035
Khoa học thông tin và điện toán	Cao	3-4	2035 hoặc muộn hơn
Cảm biến	Cao	3-4	2035 hoặc muộn hơn

Nguồn: NATO (2023), Science & Technology Trends 2023-2043.

3.2. Công nghệ sinh học và tăng cường năng lực của con người (BHET)

Công nghệ sinh học sử dụng sinh vật, mô, tế bào hoặc các thành phần phân tử có nguồn gốc từ sinh vật sống để tác động lên sinh vật hoặc can thiệp vào hoạt động của tế bào, bao gồm vật liệu di truyền của chúng. Công nghệ này mang lại tiềm năng to lớn trong việc tạo ra những đột phá quan trọng, đặc biệt là trong NC&PT. Một lĩnh vực liên quan đáng chú ý là công nghệ tăng cường năng lực con người (HET), bao gồm các can thiệp y sinh nhằm nâng cao hình thái hoặc chức năng của con người, vượt ra khỏi nhu cầu duy trì hoặc phục hồi sức khỏe cơ bản.

Từ trước đến nay, công nghệ sinh học đã và sẽ tiếp tục là một lĩnh vực mang tính đột phá, đặc biệt khi được ứng dụng trong y tế và chăm sóc sức khỏe. Tuy nhiên, tiềm năng này đôi khi bị thổi phồng quá mức, do các nghiên cứu liên quan đến sinh học và con người luôn bị ràng buộc bởi giới hạn vật lý, sinh học, đạo đức, pháp lý và luân lý. Điều này dẫn đến xu hướng đánh giá quá cao mức độ trưởng thành của công nghệ sinh học cũng như khả năng ứng dụng rộng rãi của nó. Những kỳ vọng như y học cá nhân hóa, tích hợp người-máy (HMI) hay giao diện thần kinh trực tiếp giữa sinh học và công nghệ thường được truyền thông phóng đại, trong khi những lợi ích và rủi ro dài hạn của công nghệ sinh học lại thường bị hiểu sai - điển hình như sự phát triển của vắc-xin COVID-19.

Từ thuở sơ khai, con người đã tìm cách điều chỉnh môi trường sinh học và cải thiện khả năng thể chất, từ việc sử dụng da thú, công cụ bằng đá đến nông nghiệp để tạo ra lợi thế tiến hóa. Tuy nhiên, công nghệ sinh học và tăng cường năng lực con người dự kiến sẽ đạt được những bước tiến đột phá trong vòng 20 năm tới.

Những công nghệ này bao trùm nhiều lĩnh vực của khoa học sinh học, bao gồm chỉnh sửa gen (như CRISPR) để phát triển mầm bệnh hoặc tạo ra các liệu pháp điều trị tiên tiến; các phương pháp sản xuất dựa trên quy trình sinh học; tăng cường năng lực con người thông qua robot tích hợp, chẳng hạn như bộ xương ngoài hoặc bộ phận thay thế; giao diện thần kinh hỗ trợ kết nối con người với máy móc; thị giác nâng cao; cộng sinh xã hội - kỹ thuật với AI và hệ thống tự động; các phương pháp dược lý giúp nâng cao nhận thức và thể chất; ảo hóa môi trường xã hội - nhận thức, giúp phát triển các cấu trúc xã hội, thông tin và tổ chức mới; cùng với cảm biến sinh học và tin sinh học hỗ trợ hiểu biết sâu hơn về hành vi xã hội - nhận thức, sinh lý, kinh tế và thần kinh, qua đó nâng cao hiệu suất, khả năng thích ứng và tối ưu hóa các nhiệm vụ phân tích.

Hiện nay, công nghệ sinh học và công nghệ tăng cường năng lực con người thế hệ mới vẫn đang ở giai đoạn sơ khai. Tuy nhiên, một số nhà phân tích nhận định rằng, dựa trên những cuộc cách mạng công nghệ trong AI và thông tin mà chúng ta đã chứng kiến, chu kỳ công nghệ cách mạng tiếp theo sẽ được định hình bởi sinh học tổng hợp.

Các lĩnh vực nghiên cứu công nghệ sinh học và tăng cường năng lực con người mang tính đột phá sẽ được trình bày chi tiết trong các phân mục sau:

Chiến tranh sinh học và y tế

Các lĩnh vực quan tâm chính bao gồm công nghệ và khoa học tiên tiến nhằm xác định mầm bệnh, ngăn chặn quá trình sinh lý bệnh do tác nhân sinh học, phát triển nhóm thuốc mới như thuốc tăng cường hiệu suất và kháng sinh, cũng như cải thiện các biện pháp phòng ngừa, sinh trắc học, chăm sóc vết thương và tái tạo mô.

Di truyền học và vi sinh học

Nghiên cứu di truyền hiện nay đang tập trung vào phát triển thuốc cá nhân hóa, đồng thời cải thiện các phương pháp điều trị và phòng ngừa bệnh tật. Những tín hiệu ban đầu trong lĩnh vực này cho thấy thông tin hệ gen có thể ngày càng đóng vai trò quan trọng trong chăm sóc sức khỏe và được tích hợp vào hệ thống y tế. Công nghệ chỉnh sửa gen như CRISPR-Cas9 đã thúc đẩy các nghiên cứu chuyên sâu hơn về các công cụ chỉnh sửa gen khác và tìm ra những phương pháp giảm thiểu rủi ro do chỉnh sửa gen, dù là vô tình hay cố ý gây ra.

Dự kiến, trong vòng 20 năm tới, những đột phá quan trọng trong lĩnh vực này sẽ giúp nâng cao hiệu quả của nghiên cứu hệ gen phục vụ y học và công nghệ sinh học. Các thành tựu này gắn liền với sự phát triển của tin sinh học, với những xu hướng đáng chú

ý như: kiểm soát nguy cơ lạm dụng công nghệ chỉnh sửa gen, phát triển công nghệ chỉnh sửa gen thay thế, giải trình tự bộ gen thế hệ mới, nghiên cứu hệ gen của quần thể vi sinh vật và giải trình tự gen de novo (tái tạo trình tự gen từ đầu). Những đổi mới này hứa hẹn sẽ nâng cao khả năng ứng phó với bệnh tật, phát triển các liệu pháp điều trị và tối ưu hóa công nghệ sinh học trong tương lai.

Kỹ thuật sinh học

Kỹ thuật sinh học ứng dụng các nguyên lý kỹ thuật vào hệ thống sinh học và công nghệ y sinh, bao gồm cả thiết kế và phân tích để tạo ra các giải pháp đột phá. Các nghiên cứu tiên tiến, với sự hỗ trợ của AI và ML, đang phát triển các hệ thống đa tế bào phức tạp như xenobots - các robot sinh học có khả năng tự tái tạo, giúp mở rộng năng lực sinh học và tạo ra vật liệu có chức năng chuyên biệt.

Bên cạnh đó, các công cụ và kỹ thuật thiết kế sinh học đang không ngừng được cải tiến, hứa hẹn mở ra những ứng dụng đột phá trong sản xuất sinh học, phân tích hệ thống sinh học và khai thác cơ chế sinh học để giải quyết các thách thức phức tạp.

Trong vòng 20 năm tới, kỹ thuật sinh học dự kiến sẽ trở nên dễ tiếp cận hơn và giảm đáng kể chi phí, nhờ vào các tiến bộ trong giải mã, tổng hợp và chỉnh sửa gen. Nhiều nghiên cứu đang hướng tới việc thiết kế các hệ thống đa tế bào phức tạp, cho phép mở rộng khả năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Những đổi mới quan trọng bao gồm: in sinh học 3D, kỹ thuật sinh học tích hợp AI/ML, vật liệu lai, vật liệu sinh học mô phỏng tổng hợp, vật liệu thông minh và các mô hình cơ quan thu nhỏ (“brain balls”), mở ra tiềm năng to lớn cho y học, công nghệ sinh học và kỹ thuật sinh học trong tương lai.

Sinh học hệ thống và tin sinh học

Sinh học hệ thống là phương pháp nghiên cứu các hệ thống sinh học phức tạp thông qua phân tích định lượng quy mô lớn về các tương tác động giữa nhiều thành phần của hệ sinh học. Các lĩnh vực đặc biệt được quan tâm bao gồm cảm biến sinh học CBRN thế hệ mới và sinh học tính toán. Với sự tiến bộ trong dữ liệu lớn, AI, RAS) cùng tiềm năng của công nghệ lượng tử, cách tiếp cận hệ thống này, kết hợp với sự phát triển của tin sinh học, sẽ tạo điều kiện cho nhiều công nghệ sinh học và công nghệ tăng cường năng lực con người tiếp tục phát triển.

Việc hiểu rõ các quy trình cơ bản của mạng lưới sinh học, khai thác dữ liệu lớn và AI, cùng với sự phát triển của cảm biến CBRN mới, là những lĩnh vực quan trọng dự kiến sẽ đạt được bước tiến đáng kể trong 20 năm tới.

Tăng cường nhận thức

Tăng cường nhận thức là một trong những công nghệ tăng cường năng lực con người được quan tâm nhiều nhất, nhưng cũng là một trong những lĩnh vực khó đạt được nhất. Việc nâng cao năng lực nhận thức phụ thuộc vào sự hiểu biết về cấu trúc não bộ và các

quá trình nhận thức liên quan. Những đổi mới trong xử lý dữ liệu, công nghệ cảm biến và giao diện não - máy (BMI) đang đóng vai trò nền tảng, thúc đẩy sự phát triển nhanh chóng của lĩnh vực này và dự kiến sẽ tiếp tục trong 20 năm tới.

Bên cạnh đó, những tiến bộ trong khoa học thần kinh đang được ứng dụng để cải thiện hiệu suất nhận thức, điều trị các vấn đề thần kinh và tâm thần, cũng như phát triển các phương pháp điều trị chấn thương não, bệnh thoái hóa thần kinh và rối loạn tâm thần, bao gồm cả rối loạn căng thẳng sau sang chấn .

Các nghiên cứu ban đầu tập trung vào các phương pháp mới để tăng cường nhận thức, đặc biệt chú trọng vào phục hồi và thay thế các chức năng bị suy giảm. Bằng cách tận dụng các tiến bộ từ sinh học hệ thống, các mô hình mạng dự đoán đang trở thành lĩnh vực nghiên cứu trọng tâm, cung cấp các công cụ để lượng hóa cấu trúc và dự đoán chức năng của hệ thần kinh. Trong tương lai, điều này có thể giúp dự đoán năng lực nhận thức, phát hiện sớm sự khởi phát hoặc tiến triển của bệnh lý thần kinh, phân tích phản ứng hành vi trước các thông điệp sức khỏe, hoặc xây dựng các chiến lược can thiệp sớm.

Khi hiểu biết về hoạt động của não bộ ngày càng chính xác, các kỹ thuật theo dõi và can thiệp vào hoạt động thần kinh sẽ được phát triển, mở ra cơ hội điều trị rối loạn thần kinh và cải thiện chức năng não bộ. Những tiến bộ này mang đến hy vọng về các phương pháp can thiệp trực tiếp, qua đó nâng cao chất lượng chăm sóc y tế sau chấn thương.

Các đổi mới trong dữ liệu, cảm biến và giao diện não - máy đang đóng vai trò quan trọng trong việc thúc đẩy mạnh mẽ sự phát triển của lĩnh vực này. Một lĩnh vực nghiên cứu cụ thể là phục hồi nhận thức sau chấn thương và tăng cường năng lực nhận thức, trong đó các sáng kiến và ứng dụng dự kiến sẽ phát triển nhanh chóng. Tuy nhiên, sự phát triển của công nghệ này vẫn sẽ bị giới hạn bởi các quy trình thử nghiệm cần thiết và những cân nhắc về đạo đức, pháp lý và luân lý.

Tăng cường Xã hội

Mạng xã hội ngày càng đóng vai trò quan trọng trong đời sống hiện đại, nhưng phần lớn các hoạt động NC&PT trong lĩnh vực này vẫn chủ yếu được thúc đẩy bởi lợi ích thương mại. Tuy nhiên, các phương pháp hiểu rõ, mô hình hóa và mô phỏng động lực của hệ thống xã hội đang trở nên tinh vi hơn, giúp nâng cao hiểu biết về hành vi con người.

Sự phát triển này không chỉ cho phép dự đoán chính xác hơn các đặc tính của hệ thống xã hội, mà còn mở ra khả năng tác động có chủ đích đến xã hội, chẳng hạn như chiến dịch thông tin sai lệch, chiến tranh nhận thức và chiến tranh lai.

Một hướng nghiên cứu quan trọng khác là việc ứng dụng thực tại ảo để mở rộng và nâng cao tương tác xã hội, tạo ra những môi trường kết nối phong phú hơn trong cả ứng dụng dân sự lẫn quân sự. Những tiến bộ trong lĩnh vực này cũng sẽ thúc đẩy sự hợp tác

giữa con người và máy móc, giúp định hình các phương thức giao tiếp và tương tác mới.

NC&PT trong lĩnh vực này sẽ tập trung vào mô hình hóa và mô phỏng động lực của hệ thống xã hội, nhằm dự đoán những đặc tính mạng xã hội mới xuất hiện. Đặc biệt, trong bối cảnh thông tin sai lệch và thao túng nhận thức ngày càng gia tăng, những nghiên cứu này sẽ đóng vai trò quan trọng trong việc phát triển các công cụ phân tích và phòng thủ hiệu quả hơn. Bên cạnh đó, thực tại xã hội ảo cũng được dự đoán sẽ tiếp tục mở rộng và phát triển sâu sắc hơn, trở thành một phần quan trọng trong thông tin liên lạc và tương tác kỹ thuật số trong tương lai.

Nâng cao hiệu suất thể chất

Các hoạt động NC&PT đang mở ra những phương pháp tiên tiến nhằm nâng cao hiệu suất con người, thông qua tích hợp người - máy và phát triển các loại dược phẩm mới. Những phương pháp tính toán hiện đại sẽ giúp dự đoán và tối ưu hóa hoạt tính của thuốc, từ đó thúc đẩy sự ra đời của liệu pháp dược lý có khả năng tác động đến nhiều mục tiêu sinh học khác nhau trong cơ thể con người.

Cộng sinh người-máy

Việc tăng cường hiệu suất con người thông qua các phương tiện cơ học hoặc điện tử đang phát triển nhanh chóng nhờ sự tiến bộ trong AI, ML và giao diện người - máy. Các lĩnh vực quan tâm đặc biệt bao gồm thay thế chức năng sinh học và nhận thức, thị giác máy tính và thực tế tăng cường, giúp con người mở rộng khả năng cảm nhận và tương tác với môi trường xung quanh.

Những đột phá trong lĩnh vực này đang được thúc đẩy bởi AI/ML, kết hợp với các kỹ thuật ghi và thao tác tín hiệu thần kinh tiên tiến, cho phép nghiên cứu cách tích hợp nhiều tín hiệu cảm biến và biến chúng thành hành vi đầu ra. Các yếu tố SWaP-C sẽ tiếp tục đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa và triển khai công nghệ, từ đó mở rộng ứng dụng của các thiết bị tăng cường cảm biến và vận động, chẳng hạn như kính áp tròng thực tế ảo và bộ xương ngoài hỗ trợ vận động.

Bảng 3.2. Công nghệ sinh học và tăng cường năng lực của con người, 2023-2043

Lĩnh vực trọng tâm	Tác động	TRL	Giai đoạn dự kiến
Kỹ thuật sinh học và di truyền học	Cao	5-6	2030-2035
Tin sinh học	Cao	7-8	2025-2030
Sản xuất sinh học	Cao	3-4	2030-2035
Cảm biến sinh học và điện tử sinh học	Cao	3-4	2030-2035
Tăng cường nhận thức	Cách mạng	3-4	2035 hoặc muộn hơn
Cộng sinh người - máy	Cách mạng	3-4	2035 hoặc muộn hơn
Tăng cường thể chất	Cao	5-6	2030-2035

Tăng cường xã hội	Cao	5-6	2030-2035

Nguồn: NATO (2023), Science & Technology Trends 2023-2043.

3.3. Vật liệu mới và sản xuất tiên tiến

Vật liệu tiên tiến là những vật liệu nhân tạo sở hữu các tính chất độc đáo và mới lạ, được tạo ra nhờ công nghệ nano, sinh học tổng hợp hoặc các phương pháp sản xuất hiện đại. Những hướng phát triển quan trọng trong lĩnh vực này bao gồm lớp phủ chịu nhiệt cực cao, áo giáp siêu bền dành cho con người và nền tảng kỹ thuật, lớp phủ tàng hình, công nghệ thu hoạch và lưu trữ năng lượng, siêu dẫn, cảm biến tiên tiến, công nghệ khử nhiễm, cũng như sản xuất thực phẩm, nhiên liệu và vật liệu xây dựng với quy mô lớn.

Nghiên cứu về graphene, các vật liệu 2D mới khác và vật liệu tôpô đang thu hút sự quan tâm ngày càng lớn, nhờ tiềm năng mang lại những đột phá trong công nghệ điện tử, vật liệu siêu nhẹ và năng lượng. Sản xuất đắp dần, còn gọi là in 3D, là một phương pháp cho phép tạo ra vật thể 3D từ mô hình kỹ thuật số bằng cách xếp chồng từng lớp vật liệu. Công nghệ này có ứng dụng rộng rãi trong tạo mẫu nhanh, sản xuất và sửa chữa tại chỗ các thiết bị quân sự hoặc công nghiệp, cũng như chế tạo các chi tiết có độ chính xác cao và đặc tính vật liệu độc đáo.

Từ những công cụ bằng đá của thời kỳ đồ đá mới đến việc chế tạo sắt, thép và nhôm, sự tiến bộ của nền văn minh luôn gắn liền với những bước nhảy vọt trong khoa học vật liệu. Các nghiên cứu hiện đại trong lĩnh vực này đang tạo ra những đột phá quan trọng trong công nghiệp và sản xuất, tập trung vào thiết kế, phát triển, lắp ráp và tối ưu hóa các vật liệu tiên tiến. Sự phát triển này được thúc đẩy bởi các tiến bộ trong dữ liệu lớn, AI/ML, công nghệ không gian, công nghệ lượng tử, siêu thanh và công nghệ sinh học.

Những lợi ích quan trọng của nghiên cứu về vật liệu mới bao gồm khả năng thích ứng linh hoạt với các yêu cầu thay đổi, khả năng sản xuất theo yêu cầu, nâng cao hiệu suất sản xuất, tăng độ bền của nền tảng kỹ thuật, cải thiện thiết kế sản phẩm và tạo ra những loại vật liệu mà trước đây không thể đạt được bằng phương pháp truyền thống. Đồng thời, các nghiên cứu này cũng nhằm giải quyết những thách thức về SWaP-C, một yếu tố ngày càng quan trọng khi công nghệ tiếp tục phát triển. Một trong những thách thức lớn nhất là yêu cầu về các quy trình công nghiệp thân thiện với môi trường và giảm mức tiêu thụ năng lượng.

Trong 20 năm tới, những bước tiến trong vật liệu mới và sản xuất hiện đại dự kiến sẽ tạo ra những tác động mang tính đột phá. Trong khi sản xuất linh hoạt, chẳng hạn như in 3D/4D, đang được đánh giá là sẽ cách mạng hóa chuỗi cung ứng, năng lực sản xuất và hậu cần, các công nghệ cơ bản liên quan đến lĩnh vực này đã được triển khai rộng rãi và tiếp tục được phát triển mạnh mẽ trong ngành công nghiệp.

Tuy nhiên, lĩnh vực nghiên cứu tiên tiến nhất hiện nay không chỉ tập trung vào sản xuất, mà còn hướng đến sự phát triển của các vật liệu hoàn toàn mới. Điều này bao gồm graphene, graphyne và các vật liệu 2D khác, vật liệu nano lượng tử, vật liệu có tính chất độc đáo, cũng như phương pháp sản xuất hoàn toàn mới dựa trên công nghệ sinh học. Việc thao tác vật liệu ở cấp độ nano, khả năng in kết hợp nhiều loại vật liệu khác nhau, cùng với ứng dụng của AI, dữ liệu lớn và phân tích tiên tiến trong việc khám phá vật liệu mới đang mở ra những tiềm năng chưa từng có.

Những nghiên cứu này được thúc đẩy bởi tham vọng khám phá và khai thác các đặc tính vật lý độc đáo, chẳng hạn như tính siêu dẫn, khả năng tăng cường hiệu suất vật liệu, tạo ra các giải pháp thân thiện môi trường và giải quyết những thách thức liên quan đến SWaP-C, đặc biệt là tối ưu hóa trọng lượng và tiết kiệm năng lượng trong công nghệ cao.

Sự tiến bộ trong lĩnh vực này có thể được chia thành hai nhóm sau:

Vật liệu mới

Các lĩnh vực đáng chú ý bao gồm vật liệu 2D mới, graphene, graphyne, các loại polymer tiên tiến, vật liệu nano và siêu vật liệu.

Nghiên cứu vật liệu là nền tảng cho nhiều tiến bộ công nghệ hiện đại, từ điện tử đến sản xuất quần áo. Tuy nhiên, các tính chất và hành vi của vật liệu thường là yếu tố hạn chế sự phát triển của công nghệ mới. Do đó, những đột phá trong khoa học vật liệu có thể tạo ra tác động đáng kể đến toàn bộ bức tranh công nghệ. Dưới đây là một số lĩnh vực nghiên cứu đầy hứa hẹn với tiềm năng tạo ra những đột phá lớn.

Trước tiên, các vật liệu 2D có khả năng mang lại những tác động đột phá thực sự. Graphene, vật liệu 2D tiêu biểu nhất, được phân lập hoàn chỉnh vào năm 2004. Đây là một trong những vật liệu tinh thể mỏng nhất, bền nhất, cứng nhất và có độ co giãn tốt nhất. Nhờ những đặc tính vượt trội này, vật liệu 2D trở thành một trong những lĩnh vực NC&PT trọng điểm, hướng đến việc khai thác các đặc tính đặc biệt của graphene cũng như các vật liệu 2D tương tự, chẳng hạn như graphyne - một dạng carbon khác. Sự tìm kiếm các vật liệu 2D thay thế graphene đang diễn ra sôi động nhằm mở rộng khả năng ứng dụng trong công nghệ.

Gần đây, đã có 8 vật liệu mới có cấu trúc tương tự graphene đã được xác định, bao gồm antimonene, arsenene (một lớp đơn arsenic dạng tổ ong gợn sóng), bismuthine, borophane, borophene, phagraphene, phosphorene và stanene. Ngoài ra, một số vật liệu 2D khác như $Cr_2Ge_2Te_6$, disulfua rheni, cacbua titan và molybdenum ditelluride cũng sở hữu các đặc tính quang học, từ tính, vật lý hoặc điện học độc đáo. Nhu cầu khám phá các đặc tính đặc biệt này, cũng như ứng dụng của chúng trong điện tử và lưu trữ năng lượng, đang thúc đẩy mạnh mẽ các nghiên cứu chuyên sâu. Những đặc tính này cũng đặc biệt hữu ích cho các ứng dụng tiềm năng trong lĩnh vực quốc phòng và an ninh.

Polyme cũng đóng vai trò quan trọng và thiết yếu trong cả kinh tế và quân sự, và đã được nghiên cứu rộng rãi trong hơn một thế kỷ qua. Tuy nhiên, vẫn còn một số lĩnh vực nghiên cứu nổi bật, bao gồm tạo ra các cấu trúc topo phức tạp, vật liệu polymer chức năng, vật liệu bền vững, polymer sinh học và polymer tự phục hồi.

Vật liệu nano, với kích thước ở cấp nano mét (một phần tỷ mét), có thể sở hữu các đặc tính quang học, điện tử, sinh học hoặc cơ học đặc biệt. Hai hướng nghiên cứu quan trọng hiện nay là vật liệu nano sinh học và các chấm lượng tử, với tiềm năng ứng dụng lớn trong y học, điện tử và lưu trữ năng lượng.

Siêu vật liệu là một lĩnh vực NC&PT đầy hứa hẹn. Được phát triển từ đầu những năm 2000, siêu vật liệu là các vật liệu kỹ thuật có thiết kế đặc biệt, sử dụng cấu trúc hoặc mẫu vật lý tinh vi để tạo ra các đặc tính quang học, âm học và điện từ chưa từng xuất hiện trong tự nhiên. Nhờ đó, chúng cho phép kiểm soát vượt trội trong việc định hướng và điều khiển sóng, dù là sóng điện từ hay sóng âm. Một số lĩnh vực nghiên cứu nổi bật trong siêu vật liệu bao gồm siêu vật liệu âm học, siêu vật liệu điện từ và siêu vật liệu động lực học.

Ngoài các danh mục trên, nhiều nghiên cứu đang được tiến hành nhằm phát triển các vật liệu tiên tiến hoàn toàn mới. Một số lĩnh vực hấp dẫn nhất bao gồm vật liệu siêu dẫn, vật liệu chịu được điều kiện khắc nghiệt, vật liệu composite siêu nhẹ, vật liệu quy mô nano và vật liệu thân thiện với môi trường. Những nghiên cứu này không chỉ góp phần định hình tương lai của khoa học vật liệu mà còn mở ra các giải pháp tiên tiến cho nhiều ngành công nghiệp trong những thập kỷ tới.

Sản xuất tiên tiến

Các phương pháp sản xuất tiên tiến bao gồm nhiều kỹ thuật hiện đại nhằm thích ứng với các tiến bộ đổi mới liên tục trong quy trình công nghiệp. Tuy nhiên, sẽ là thiếu sót nếu xem những phát triển trong EDT chỉ đơn thuần là sự cải tiến thông thường của sản xuất công nghiệp. Một số công nghệ mới đang được nghiên cứu với tiềm năng tạo ra những đột phá đáng kể, trong đó có hai lĩnh vực nổi bật là in 3D/4D và sản xuất sinh học.

Công nghệ in 3D và sản xuất đắp dần đã trở nên phổ biến trong ngành sản xuất từ đầu những năm 2000. Mặc dù hai thuật ngữ này thường được sử dụng thay thế cho nhau, in 3D chủ yếu đề cập đến quá trình bổ sung vật liệu theo từng lớp dựa trên mô hình kỹ thuật số để tạo thành sản phẩm, trong khi sản xuất đắp dần là việc sử dụng in 3D ở quy mô công nghiệp để chế tạo các sản phẩm hoàn chỉnh.

Những năm gần đây đã chứng kiến nhiều bước tiến quan trọng trong kỹ thuật in, thiết bị, vật liệu, quy trình in và hậu xử lý. Các ứng dụng và phương pháp in mới tiếp tục phát triển nhanh chóng, khiến đây trở thành một lĩnh vực nghiên cứu sôi động. Một trong những ứng dụng tiềm năng nhất là mô phỏng sinh học, trong đó các cấu trúc sinh học được tái tạo thông qua công nghệ in 3D.

Việc ứng dụng in 3D rộng rãi hơn có thể tạo ra tác động đột phá đáng kể trong lĩnh vực quốc phòng. Hiện nay, các dây chuyền sản xuất thiết bị quân sự thường bị đóng cửa sau khi kết thúc sản xuất, dẫn đến việc toàn bộ linh kiện dự phòng phải được sản xuất trước khi dây chuyền dừng hoạt động. Hệ quả là nhiều thiết bị quân sự bị loại bỏ khi việc tìm kiếm linh kiện thay thế trở nên không còn hiệu quả về mặt chi phí. Trên lý thuyết, công nghệ in 3D có thể tái tạo linh kiện nếu còn lưu trữ mô hình kỹ thuật số, từ đó kéo dài tuổi thọ thiết bị quan trọng và khôi phục nhanh chóng các dây chuyền sản xuất.

Vật liệu in 4D lần đầu tiên được phát triển vào năm 2013, là một bước tiến xa hơn của in 3D. Đây là vật liệu có khả năng tự biến đổi khi tiếp xúc với các kích thích từ môi trường như nhiệt độ, áp suất, độ ẩm, ánh sáng hoặc độ pH. Những vật liệu này mở ra tiềm năng lớn cho các thiết kế cảm biến mới và ứng dụng trong y sinh học, bao gồm robot y sinh, kỹ thuật mô và giá thể sinh học.

Một trong những ứng dụng lớn nhất của công nghệ in 3D là lĩnh vực y sinh, nơi các mô sống như xương, da, cơ quan nội tạng có thể được tạo ra bằng máy in 3D, cùng với sản xuất thuốc theo yêu cầu, thiết bị y tế tùy chỉnh và giàn giáo sinh học. Những tiến bộ này có thể cách mạng hóa phương pháp điều trị y tế và chăm sóc bệnh nhân và phục hồi chức năng.

Khi công nghệ sản xuất đắp dần tiếp tục phát triển, các kỹ thuật lắp ráp ở quy mô nano và micro cũng đang được nghiên cứu, nhằm tổng hợp, lắp ráp và chế tạo vật liệu từ cấp độ nguyên tử đến sản phẩm hoàn chỉnh. Các ứng dụng tiềm năng của công nghệ này bao gồm năng lượng, quang học, dược phẩm, điện tử và in ấn micro-nano.

Ở quy mô lớn hơn, in 3D bê tông đùn cho phép thiết kế linh hoạt hơn, giúp giảm đáng kể chi phí xây dựng và gia tăng các lựa chọn kết cấu, đặc biệt là trong công trình quân sự và môi trường khắc nghiệt. Công nghệ này có thể mang lại đột phá trong xây dựng, từ nhà trú ẩn khẩn cấp đến cơ sở quân sự trên các thiên thể ngoài Trái đất, như Mặt trăng, bằng cách sử dụng vật liệu tại chỗ, từ đó giảm chi phí và hỗ trợ điều kiện sống bền vững.

Công nghệ in 3D gốm nano cũng đang được nghiên cứu, tuy nhiên đây vẫn là một thách thức kỹ thuật lớn. Một số phương pháp in 3D tiên tiến đang thu hút sự quan tâm đặc biệt, bao gồm robocasting và in đắp dần hồ quang dây. Robocasting sử dụng vòi phun di chuyển để đùn một sợi mỏng vật liệu dạng bột nhão, có ứng dụng trong thiết bị đeo thông minh, robot mềm và y học. In đắp dần hồ quang dây sử dụng vật liệu dạng dây, sau đó nung chảy và xếp lớp, giúp giảm chi phí và thời gian chế tạo linh kiện kim loại, hỗ trợ bảo trì và sửa chữa thiết bị quân sự trong các khu vực tác chiến.

Một phương pháp sản xuất hoàn toàn khác biệt là sản xuất sinh học, có ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp. Sản xuất sinh học hoặc chế tạo sinh học tận dụng công nghệ sinh học để tạo ra vật liệu ở quy mô công nghiệp. Mặc dù những phương pháp này đã

tồn tại hàng nghìn năm (ví dụ: sản xuất bia, rượu vang), nhưng với công nghệ hiện đại, lĩnh vực này đã mở ra những phương pháp chế tạo hoàn toàn mới.

Sản xuất sinh học cho phép tạo ra vật liệu, hóa chất và dược phẩm với hiệu suất cao hơn, giảm tiêu thụ năng lượng, hạn chế nhu cầu nguyên liệu thô và tăng cường tính bền vững. Tuy nhiên, công nghệ này cũng tiềm ẩn rủi ro về sức khỏe và an toàn, đòi hỏi nghiên cứu sâu hơn để đánh giá và kiểm soát hiệu quả.

Các lĩnh vực đặc biệt đáng chú ý trong sản xuất sinh học bao gồm: xây dựng (xi măng sinh học và vật liệu xử lý ô nhiễm sinh học), điện tử (vật liệu nền linh hoạt và siêu mỏng); sản phẩm tiêu dùng (giảm chất thải và tối ưu hóa sản xuất); y tế (sản xuất thuốc và thiết bị y tế theo yêu cầu). Một ứng dụng quan trọng đặc biệt là sử dụng vi sinh vật để sản xuất sinh học trong không gian, ví dụ như chương trình B-SURE của DARPA, nhằm tạo ra vật liệu và thực phẩm trên các hành tinh khác để hỗ trợ các nhiệm vụ không gian dài hạn.

Bảng 3.3. Vật liệu mới và sản xuất tiên tiến, 20230-2043

Lĩnh vực trọng tâm	Tác động	TRL	Giai đoạn dự kiến
Vật liệu nano và sản xuất nano	Cao	5-6	2025-2030
Thiết kế mới lạ và sản xuất đắp dần	Cao	5-6	2025-2030
Vật liệu mới	Cao	3-4	2030-2035

Nguồn: NATO (2023), Science & Technology Trends 2023-2043.

IV. CÁC CÔNG NGHỆ HỘI TỤ

Các công nghệ đột phá mới nổi (EDT) hiếm khi tác động một cách đơn lẻ. Thay vào đó, chúng tạo ra ảnh hưởng đột phá mạnh mẽ nhất khi hội tụ tại giao điểm giữa các lĩnh vực vật lý, thông tin và con người, hoặc khi các công nghệ này giao thoa và kết hợp với nhau. Sự cộng hưởng công nghệ, các khám phá tình cờ và mối tương thuộc rõ ràng giữa các nhóm EDT được dự đoán sẽ đóng vai trò quan trọng trong quá trình phát triển các năng lực tương lai. Mặc dù không thể liệt kê đầy đủ tất cả các sự kết hợp có thể xảy ra, nhưng có sáu tổ hợp công nghệ được đánh giá là có tiềm năng tạo ra tác động đột phá mạnh mẽ nhất.

4.1. Dữ liệu - Trí tuệ nhân tạo - Tự động hóa

Sự kết hợp mang tính hợp lực giữa AI, tự động hóa và dữ liệu được dự đoán sẽ tạo ra tác động đột phá lớn nhất trong 10 năm tới. Sự gia tăng của các cảm biến thông minh phân tán, kết nối rộng khắp, giá thành thấp, cùng với các hệ thống tự hành (dạng vật lý hoặc ảo) sẽ tạo ra khối lượng dữ liệu khổng lồ, vượt quá khả năng xử lý của các phương pháp phân tích truyền thống.

Các công nghệ then chốt giúp giải quyết bài toán này bao gồm: mạng 5G, quản lý

phổ điện từ thông minh, IoT, AI vạn vật (AIoT), công nghệ pin tiên tiến và in 3D. Khi kết hợp với những tiến bộ trong công nghệ vũ trụ, sinh học và lượng tử, những cải tiến này có thể mang lại lợi thế chiến lược trong quá trình ra quyết định, đồng thời thúc đẩy sự phát triển của chiến tranh mạng và tác chiến thông tin - hai yếu tố ngày càng quan trọng trong chiến lược quân sự hiện đại.

4.2. Dữ liệu - Lượng tử

Trong 15 - 20 năm tới, công nghệ lượng tử sẽ nâng cao đáng kể khả năng thu thập, xử lý và khai thác dữ liệu trong các hoạt động Chỉ huy, Kiểm soát, Truyền thông, Máy tính, Tình báo, Giám sát và Trinh sát. Những tiến bộ này sẽ đến từ cảm biến lượng tử, hệ thống liên lạc bảo mật và tính toán lượng tử, giúp cải thiện độ chính xác và tốc độ xử lý thông tin.

Đặc biệt, tính toán lượng tử sẽ gia tăng tốc độ và độ chính xác trong mô hình hóa và phân tích dự đoán, đồng thời mở ra các phương pháp lượng tử mới cho mạng nơ-ron học sâu, giúp tăng cường năng lực AI.

Những năng lực này sẽ giúp tổng hợp phân tích các nghiên cứu hiện có, đẩy nhanh tốc độ khám phá khoa học cơ bản và ứng dụng. Điều này sẽ thúc đẩy sự phát triển của vật liệu mới, công nghệ sinh học, thiết kế gen và hóa học tiên tiến, mở ra những đột phá vượt sau năm 2040.

4.3. Vũ trụ - Siêu thanh - Vật liệu

Không gian và công nghệ siêu vượt âm đặt ra những thách thức vận hành lớn, đòi hỏi sự đổi mới về vật liệu tiên tiến, thiết kế khí động học, công nghệ thu nhỏ, lưu trữ năng lượng và hệ thống đẩy. Đây là những yếu tố cốt lõi để giúp các hệ thống vũ trụ và siêu thanh phát huy tối đa lợi thế chiến lược.

Cả hệ thống không gian và siêu thanh đều phải đối mặt với những điều kiện môi trường khắc nghiệt, bao gồm nhiệt độ cao và yêu cầu về độ bền vượt trội. Do đó, sự phát triển của vật liệu chịu nhiệt cao, có chi phí thấp sẽ đóng vai trò then chốt trong việc tạo ra các hệ thống bền vững và kinh tế hơn.

Ngoài ra, công nghệ in 3D/4D sẽ đóng vai trò quan trọng trong việc sản xuất các bộ phận thiết yếu, giúp giảm chi phí và tăng độ tin cậy của hệ thống.

4.4. Vũ trụ - Lượng tử

Cảm biến lượng tử trong không gian, kết hợp với phân phối khóa lượng tử, sẽ mở ra thế hệ cảm biến tiên tiến dành cho vệ tinh. Hiện tại, giới hạn về năng lượng và độ nhạy của cảm biến vẫn là những thách thức lớn, ảnh hưởng đáng kể đến thiết kế và hiệu suất vận hành của vệ tinh.

Trong 20 năm tới, cảm biến lượng tử nhỏ gọn, tiết kiệm năng lượng, độ nhạy cao sẽ

đóng vai trò chủ chốt trong các hệ thống tình báo, giám sát và trinh sát (ISR). Bên cạnh đó, việc phát triển mạng lưới thông tin liên lạc lượng tử dựa trên vệ tinh, sử dụng phân phối khóa lượng tử, sẽ trở nên cực kỳ quan trọng nếu muốn duy trì hệ thống liên lạc toàn cầu bảo mật tuyệt đối.

4.5. Dữ liệu - Trí tuệ nhân tạo - Công nghệ sinh học

Sự kết hợp giữa AI, dữ liệu và công nghệ sinh học sẽ có tác động to lớn đối với nền kinh tế và y tế toàn cầu.

Chi phí giải mã bộ gen người đã giảm từ 3 tỷ USD (năm 2001) xuống dưới 1.000 USD, và thời gian thực hiện chỉ dưới một giờ. Khi AI hỗ trợ thiết kế thuốc và chỉnh sửa gen, công nghệ này sẽ tăng tốc độ phát triển dược phẩm, tạo ra cảm biến sinh học sống, tác nhân sinh học tối ưu và biện pháp đối phó hóa học, sinh học, phóng xạ, hạt nhân. Ngoài ra, AI còn có thể tối ưu hóa thiết kế phân tử, mở ra phương pháp sản xuất dược phẩm và cảm biến sinh học hoàn toàn mới.

4.6. Dữ liệu - Trí tuệ nhân tạo - Vật liệu

Sự kết hợp giữa AI và dữ liệu sẽ thúc đẩy quá trình khám phá và thiết kế vật liệu mới, giúp phát hiện các đặc tính vật lý độc đáo, thao tác phản ứng hóa học, đồng thời xác định những lĩnh vực nghiên cứu mang tính đột phá.

Công nghệ này sẽ đẩy nhanh sự phát triển của vật liệu 2D, tác động mạnh mẽ đến toàn bộ hệ sinh thái KH&CN. Bên cạnh đó, sự kết hợp giữa AI, dữ liệu, in 3D/4D và sản xuất sinh học sẽ thúc đẩy sản xuất cá nhân hóa, cho phép chế tạo vật liệu lai có tính năng đặc biệt, đáng tin cậy và có thể tùy chỉnh theo nhu cầu thực tế.

4.7. Năng lượng - Vật liệu - Trí tuệ nhân tạo

Những đột phá trong công nghệ lưu trữ năng lượng, được thúc đẩy bởi graphene và các hợp chất pin tiên tiến, kết hợp với vật liệu siêu nhẹ nhưng có độ bền cao, sẽ tiếp tục đẩy nhanh quá trình điện khí hóa và chuyển đổi sang nhiên liệu xanh.

AI sẽ đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa thiết kế vật liệu và quản lý năng lượng, giúp giảm phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch. Sự hội tụ của các EDT sẽ tạo ra những đột phá quan trọng trong khoa học, quân sự và kinh tế, góp phần định hình chiến lược dài hạn cho các quốc gia tiên phong về công nghệ.

MỘT SỐ NHẬN XÉT VÀ KHUYẾN NGHỊ ĐỐI VỚI VIỆT NAM

Sự phát triển mạnh mẽ của STI đang trở thành động lực cốt lõi thúc đẩy tăng trưởng kinh tế và nâng cao năng lực cạnh tranh quốc gia. Trong bối cảnh cuộc CMCN 4.0 đang diễn ra với tốc độ nhanh chóng, việc tiếp cận và ứng dụng các công nghệ tiên tiến không chỉ là một lựa chọn, mà còn là yếu tố sống còn để Việt Nam khẳng định vị thế trong khu vực và từng bước vươn tầm thế giới.

Nhằm thúc đẩy quá trình phát triển STI, Việt Nam đã có những bước đi chiến lược với các định hướng quan trọng như Chiến lược phát triển khoa học, công nghệ và đổi mới sáng tạo đến năm 2030, đặc biệt là Nghị quyết số 57-NQ/TW ngày 22/12/2025 của Bộ Chính trị về đột phá phát triển KH&CN, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số quốc gia. Đây không chỉ là những định hướng chiến lược dài hạn, mà còn đề ra những chủ trương tập trung đầu tư vào các lĩnh vực công nghệ chiến lược, giúp nâng cao năng suất, chất lượng, năng lực cạnh tranh của nền kinh tế, thúc đẩy đổi mới sáng tạo và phát triển bền vững trong kỷ nguyên số.

Trước những chuyển động mạnh mẽ của thế giới với sự trỗi dậy của AI, công nghệ lượng tử, công nghệ sinh học, vật liệu tiên tiến và năng lượng sạch, Việt Nam cần một chiến lược phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số toàn diện, đồng bộ để bắt kịp xu hướng toàn cầu và tạo dựng lợi thế cạnh tranh dài hạn.

Dựa trên xu hướng phát triển công nghệ của thế giới, chính sách, chiến lược phát triển công nghệ của các quốc gia tiên tiến và thực trạng tiềm lực, phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số tại Việt Nam, với phương châm "đi tắt, đón đầu", trong số nhiều lĩnh vực công nghệ cao, công nghệ mới nổi, công nghệ chiến lược hiện nay, Việt Nam cần tập trung ưu tiên đầu tư nghiên cứu, phát triển một số lĩnh vực công nghệ đã được xác định trong Chiến lược phát triển STI đến năm 2030 và Nghị quyết 57 như: các công nghệ lượng tử, sinh học, vật liệu mới, trí tuệ nhân tạo, bán dẫn, chế tạo và tự động hoá, năng lượng, môi trường... Đây là những công nghệ đột phá giúp Việt Nam nâng cao năng lực cạnh tranh, tham gia sâu hơn vào chuỗi cung ứng giá trị toàn cầu và hướng tới mục tiêu trở thành quốc gia có nền KH&CN tiên tiến trong khu vực và trên thế giới.

Để phát triển và quản lý các lĩnh vực công nghệ nêu trên cần triển khai đồng bộ các giải pháp sau đây:

Một là, đẩy mạnh đầu tư vào NC&PT các công nghệ chiến lược; xây dựng cơ sở hạ tầng đồng bộ, hiện đại (phòng thí nghiệm, trang thiết bị kỹ thuật, mạng viễn thông, internet tốc độ cao, các công nghệ số, trung tâm dữ liệu lớn…) tạo nền tảng cho NC&PT các công nghệ chiến lược, rút ngắn khoảng cách với các nước phát triển.

Hai là, đào tạo nhân lực và thu hút nhân tài thông qua hỗ trợ tài chính và các chính sách ưu đãi đủ sức hấp dẫn, môi trường nghiên cứu chuyên nghiệp để nhanh chóng hình thành đội ngũ chuyên gia, nhà khoa học đầu ngành có khả năng dẫn dắt và triển khai các dự án liên quan đến công nghệ chiến lược.

Ba là, tạo lập môi trường thuận lợi và có chính sách hỗ trợ tài chính, ưu đãi thuế và khuyến doanh nghiệp, nhất là các tập đoàn kinh tế, doanh nghiệp công nghệ quy mô lớn có tiềm lực KH&CN thuộc các thành phần kinh tế đầu tư nghiên cứu, đổi mới, phát triển và làm chủ công nghệ chiến lược để nâng cao năng lực sản xuất trong nước và cạnh tranh

toàn cầu.

Bốn là, đẩy mạnh hợp tác, liên kết giữa doanh nghiệp - viện nghiên cứu - trường đại học trong nghiên cứu và phát triển công nghệ cao, công nghệ chiến lược và đưa sản phẩm công nghệ ra thị trường.

Năm là, tăng cường hợp tác quốc tế để, chủ động tìm kiếm và tham gia vào các mạng lưới nghiên cứu toàn cầu, hợp tác với các quốc gia tiên tiến, kết nối với quỹ đầu tư quốc tế để tiếp thu tri thức, chia sẻ kinh nghiệm và thu hút đầu tư, chuyển giao công nghệ cao vào Việt Nam.

Sáu là, chuyển đổi số mạnh mẽ và toàn diện để nâng cao hiệu quả quản lý vĩ mô và vi mô: Chuyển đổi số đang diễn ra mạnh mẽ trên toàn cầu, Việt Nam cần tận dụng cơ hội này để nâng cao hiệu quả quản lý, sản xuất và dịch vụ; ứng dụng công nghệ số trong quản trị nhà nước, doanh nghiệp và dịch vụ công (Tăng cường sử dụng AI, dữ liệu lớn và IoT để tối ưu hóa quản lý và vận hành); phát triển hạ tầng an ninh mạng (Đầu tư vào công nghệ mã hóa hậu lượng tử, xây dựng hệ thống phòng thủ trước các cuộc tấn công mạng); đẩy mạnh nghiên cứu và ứng dụng công nghệ bảo mật (Tích hợp AI vào các giải pháp an toàn thông tin nhằm bảo vệ dữ liệu cá nhân và doanh nghiệp)...

Bẩy là, tăng cường tự chủ công nghệ và chuỗi cung ứng. Sự phụ thuộc vào công nghệ nước ngoài và chuỗi cung ứng toàn cầu đang đặt ra nhiều thách thức, đặc biệt trong bối cảnh cạnh tranh công nghệ và xung đột thương mại gia tăng. Do đó, Việt Nam cần có chính sách hỗ trợ doanh nghiệp nội địa tham gia chuỗi giá trị toàn cầu (Chính phủ cần có chính sách khuyến khích sản xuất trong nước, giảm phụ thuộc vào nguyên liệu nhập khẩu, đồng thời thu hút các tập đoàn công nghệ lớn của nước ngoài mở rộng đầu tư tại Việt Nam). Phát triển ngành công nghiệp quốc phòng công nghệ cao. Nâng cao năng lực tự chủ về công nghệ lưỡng dụng, kết hợp giữa quốc phòng và dân sự để tăng cường sức mạnh công nghệ quốc gia.

Tám là, nghiên cứu áp dụng mô hình quản lý công nghệ của các nước phát triển. Áp dụng các chính sách kiểm soát công nghệ lưỡng dụng, bảo đảm an toàn trong chuyển giao công nghệ.

Việt Nam đang đứng trước cơ hội lớn để vươn lên trong cuộc đua công nghệ toàn cầu. Chiến lược STI đúng đắn sẽ giúp nâng cao năng lực cạnh tranh, đưa Việt Nam tiến xa hơn trên bản đồ công nghệ thế giới./.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. NATO (2023), Science & Technology Trends 2023-2043, Across the Physical, Biological, and Information Domains, VOLUME 1: Overview
2. NATO (2023), Science & Technology Trends 2023-2043, Across the Physical, Biological, and Information Domains, VOLUME 1: Analysis
3. Quyết định số 569/QĐ-TTg ngày 11/2/2022 của Thủ tướng Chính phủ: Ban hành Chiến lược phát triển khoa học, công nghệ và đổi mới sáng tạo đến năm 2030
4. Nghị quyết số 57-NQ/TW ngày 22/12/2024 của Bộ Chính trị về phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số quốc gia
5. Technology Readiness Levels, https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/